



TITLE:

スピン三重項超伝導の物理

AUTHOR(S):

前野, 悦輝

CITATION:

前野, 悦輝. スピン三重項超伝導の物理. 2006

ISSUE DATE:

2006-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/85192>

RIGHT:

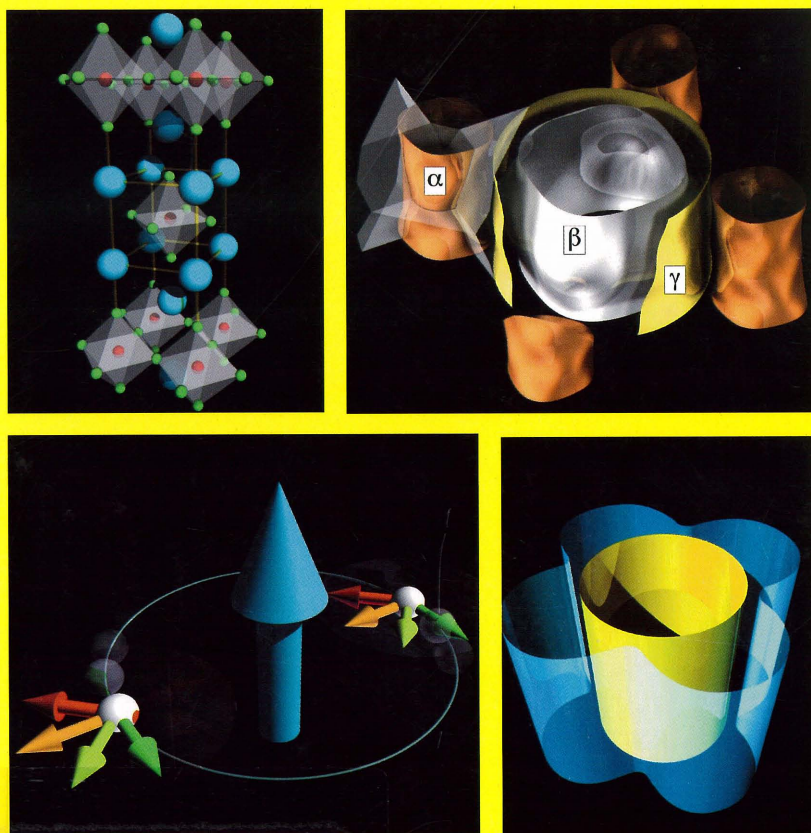
p.39-409は学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていないため未掲載。

平成13年度～平成17年度
科学研究費補助金(基盤研究(S))
研究成果報告書

研究課題番号：13852004

スピン三重項超伝導の物理

Physics of Spin-Triplet Superconductivity



京都大学図書



1060664795

附属図書館

平成18年 3月

研究代表者 前野悦輝

京都大学 国際融合創造センター教授

Physics of Spin-Triplet Superconductivity

Research Report
of Grant-in-Aid for Scientific Research (S)
from the Ministry of Education, Culture, Sports,
Science and Technology (MEXT)

Contract Number : 13852004

FY2001 - FY2005

March 2006

Head Investigator: **Yoshiteru MAENO**
International Innovation Center, Kyoto University

はしがき Preface

本報告書冊子は、平成 13 年度から平成 17 年度までの文部科学省の科学研究費補助金（基盤研究（S））を受けて行った「スピン三重項超伝導の物理」の、5 年間の研究成果をまとめたものである。平成 13 年度には基盤研究（S）の制度が始まり、その 1 期目の研究のひとつとして、明確な目的のもとに研究を遂行する機会が得られた。

本冊子には、発表論文と講演のリストだけではなく、研究成果の解説と、本科学研究費補助金で主催した国際シンポジウム「スピン三重項超伝導とルテニウム酸化物の物理」の報告も含めた。また、研究期間中の主要論文だけではなく、解説記事、そして本研究期間以前の関連研究の主要論文の一部も収録することによって、 Sr_2RuO_4 の超伝導と関連物質の物性研究についての、我々の研究成果をほぼ網羅できるようにした。

研究協力者の方々のリストからも明らかなように、本報告書にまとめた研究成果は、数多くの国内・国際共同研究によるご支援・ご協力のもとで、はじめて成り立っている。その方々に感謝するとともに、研究室の大学院生諸君、事務面で支えてくれた伊藤直子、村田佳美両氏をはじめ、さまざまな形でこの研究にかかわっていただいた方々にも深く感謝したい。

平成 18 年 3 月

研究組織メンバーを代表して：

研究代表者 前野悦輝

（京都大学国際融合創造センター 教授）

Contents

1. 研究組織	Research Organization	1
2. 主な共同研究者	Main Collaborators	2
3. 研究成果の概要	Summary of Research	4
4. 国際シンポジウム 「スピン三重項超伝導とルテニウム酸化物の物理 (STSR2004)」 The International Symposium: “Spin-Triplet Superconductivity and Ruthenate Physics (STSR2004)”		11
5. 科学賞の受賞	List of Awards	15
6. 講演リスト	List of Presentations	16
7. 発表論文・解説のリスト	List of Publications	25

8. 主な発表論文・解説	Selected Publications	37

1. 研究組織 (Research Organization)

研究代表者 Head Investigator	前野 悦輝 Yoshiteru MAENO	京都大学・国際融合創造センター・教授 Professor, International Innovation Center and Department of Physics, Kyoto University
研究分担者 Investigator	石田 憲二 Kenji ISHIDA	京都大学・大学院理学研究科・助教授 Associate Professor, Department of Physics, Kyoto University
研究分担者 Investigator	矢口 宏 Hiroshi YAGUCHI	京都大学・大学院理学研究科・助手 Assistant Professor, Department of Physics, Kyoto University
研究分担者 Investigator	中辻 知 Satoru NAKATSUJI	京都大学・大学院理学研究科・講師 (2006年4月より東京大学物性研究所・助教授) Lecturer, Department of Physics, Kyoto University (After April 2006: Associate Professor, Institute of Solid State Physics, University of Tokyo)
研究分担者 Investigator	山田 耕作 Kosaku YAMADA	京都大学・大学院理学研究科・教授 Professor, Department of Physics, Kyoto University
海外共同研究者 Foreign Collaborator	マンフレッド シグリスト Manfred SIGRIST	スイス連邦工科大学 (ETH)・理論研究所・教授 Professor, Theoretical Institute, ETH Zurich, Switzerland

配分額 (Grant)

(合計単位: 円, in JP Yen)

	直接経費 (Direct)	間接経費 (Indirect)	合計 (Total)
平成 13 年度 (FY2001):	¥48,700,000	¥14,610,000	¥63,310,000
平成 14 年度 (FY2002):	¥25,700,000	¥7,710,000	¥33,410,000
平成 15 年度 (FY2003):	¥6,100,000	¥1,830,000	¥7,930,000
平成 16 年度 (FY2004):	¥5,700,000	¥1,710,000	¥7,410,000
平成 17 年度 (FY2005):	¥5,300,000	¥1,590,000	¥6,890,000
総 計 (Grand Total):	¥91,500,000	¥27,450,000	¥118,950,000

2. 主な研究協力者 (Main Collaborators)

主な国内研究協力者 (Main Domestic Collaborators)

(京都大学大学院理学研究科、Graduate School of Science, Kyoto University)

出口和彦 (K. Deguchi, now at Nagoya Univ.)、菊川直樹 (N. Kikugawa, now at AIST)、M.A. Tanatar (now at Univ. of Sherbrooke, Canada)、石黒武彦 (T. Ishiguro, now at Doshisha Univ.)、西崎修司 (S. NishiZaki)、深澤英人 (H. Fukazawa, now at Chiba Univ.)、南方雅成 (M. Minakata)、秋間崇 (T. Akima)、鈴木誠 (M. Suzuki)、和田将彦 (M. Wada)、吉岡正樹 (M. Yoshioka)、滝沢恵一 (K. Takizawa)、房登真司 (S. Fusanobori)、吉村一良 (K. Yoshimura)、村川寛 (H. Murakawa)、北川健太郎 (K. Kitagawa)、井原慶彦 (Y. Ihara)、米澤進吾 (S. Yonezawa)、橘高俊一郎 (S. Kittaka)、高津浩 (H. Takatsu)、竹谷英朗 (H. Takeya)、M. Kriener、野村拓司 (T. Nomura, now at SPring-8)、大見哲巨 (T. Ohmi)、池田隆介 (R. Ikeda)、藤本聡 (S. Fujimoto)、池田浩章 (H. Ikeda)

(北海道大学、Hokkaido University) 天谷健一 (K. Tenya)、浅野泰寛 (Y. Asano)

(東北大学) 村上洋一 (Y. Murakami)

(産総研、AIST) 池田伸一 (S. Ikeda)、白川直樹 (N. Shirakawa)

(物材機構、NIMS) 室町英治 (E. Takayama-Muromachi)、桜井裕也 (H. Sakurai)

(KEK) 久保田正人 (M. Kubota)

(東京大学 物性研究所、Institute for Solid State Physics, University of Tokyo)

大道英二 (E. Ohmichi)、田山孝 (T. Tayama)、榊原俊郎 (T. Sakakibara)

(東京大学大学院新領域創成研究科、Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo)

藤森淳 (A. Fujimori)、溝川貴司 (T. Mizokawa)

(東京大学大学院理学系研究、Graduate School of Science, University of Tokyo) 福山寛 (H.

Fukuyama)、神原浩 (H. Kambara)、柳瀬陽一 (Y. Yanase)、宇田川将文 (M. Udagawa)

(東京大学大学院工学系研究科、School of Engineering, University of Tokyo)

徳永将史 (M. Tokunaga)、為ヶ井強 (T. Tamegai)

(NTT 物性科学基礎研究所、NTT Basic Research Laboratories)

高柳英明 (H. Takayanagi)、赤崎達志 (T. Akazaki)、川村稔 (M. Kawamura, now at Riken)

(名古屋大学、Nagoya University) 田仲由喜夫 (Y. Tanaka)
(大阪大学大学院基礎工学研究科、Graduate School of Engineering Science, Osaka University)
 棕田秀和 (H. Mukuda)、北岡良雄 (Y. Kitaoka)、三宅和正 (K. Miyake)
(SPRING-8) 櫻井吉晴 (Y. Sakurai)
(岡山大学、Okayama University) 町田一成 (K. Machida)
(広島大学、Hiroshima University) 藤田敏三 (T. Fujita now at Waseda Univ.)、鈴木孝至 (T. Suzuki)、中村文彦 (F. Nakamura)、奥田法樹 (N. Okuda now at Chuo Univ.)、小口多美夫 (T. Oguchi)、宇田川眞行 (M. Udagawa)

主な海外研究協力者 (Main International Collaborators)

(UK) A.P. Mackenzie, C. Bergemann, S.R. Julian, S.A. Grigera, R. Borzi, R.S. Perry, G.G. Lonzarich,
 E.M. Forgan, S. Hayden, P.L. Alireza, M. Sutherland, A.J. Schofield, M. Chiao
(The Netherlands) A.F. Morpurgo
(Germany) M. Braden, P. Steffens, A. Gukasov, K. Pucher, A. Loidl, P. Gegenwart, C. Pfleiderer
(France) Y. Sidis, O. Friedt, P. Bourges, K. Hasselbach
(Switzerland) J.G. Bednorz, T.M. Rice, A.C. Mota
(Italy) A. Vecchione, R. Fittipaldi, F. Tafuri, D. Born
(Russia) V. I. Anisimov

(Korea) T.W. Noh, Y.S. Lee, J.S. Lee

(Canada) L. Taillefer, C. Lupien, G.M. Luke, W. A. McFarlane, G.A. Sawatzky
(USA) Z.Q. Mao, J. Hooper, Z.X. Shen, A. Damascelli, K.M. Shen, K.A. Moler, P. Bjornsson, Y. Liu,
 K.D. Nelson, R. Jin, J. Kirtley, D. Van Harlingen, J.C. Davis, L. Balicas, D. Agterberg, A. Gulian,
 K.S. Wood, H. Rho, S. L. Cooper, Y.J. Uemura, S. Hill, Z. Fisk

3. 研究成果の概要 (Summary of Research)

【研究目的】

従来の超伝導はスピン一重項（シングレット）の電子対が担っている。この点では銅酸化物の高温超伝導（シングレット d 波）も例外ではない。これに対して、超流動 ^3He は核スピン三重項（トリプレット p 波）の原子対が担う。それではスピン三重項の超伝導状態は実現しうるのか？またそれはどのような超伝導現象をとまうのか？このようなスピン三重項の超伝導の物理についての我々の知見を深めるのが本研究の大きな目的である。

ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 は、本研究代表者の前野ら
がその超伝導を発見した物質（転移温度 $T_c = 1.5 \text{ K}$ ）で、
銅酸化物の高温超伝導体と同じ結晶構造をとる。本研究
メンバーを核とした研究により、電子対のスピン状態が
合成スピン $S = 1$ の三重項であることが実験的に確定と
なっている。本研究の具体的な研究目的は、軌道波動関
数も含めて Sr_2RuO_4 の超伝導状態を確定するとともに、
この物質を舞台に、電荷を帯びたスピン三重項超流体と
しての、スピン三重項の超伝導状態に関わる新しい物理
現象を開拓することにある。本課題では育成した大型・
純良単結晶試料を用いた、比熱・熱伝導率、核磁気共鳴、
電磁輸送現象等の研究、また国内外の研究グループに純
良単結晶を供給しての共同研究、さらには理論研究との
密接な関わりを通じてこの目的の達成を図る。



Sr_2RuO_4 の層状結晶構造とその超伝導電子対のスピンと軌道角運動量の模式図。

【研究成果の概要】

本研究の最も重要な学問的・学術的成果は、スピン三重項の電子対からなる超伝導状態が現実に存在することを、多角的かつ緻密な研究の集積によって確定的にし、また広い認知を得たことである。 Sr_2RuO_4 というひとつの超伝導体を軸にした集中的な研究を行うことから、超伝導ギャップ異方性の測定法の確立、超伝導マルチギャップ構造の決定、異方的超伝導における非磁性不純物の効果の定量的理解、超伝導・常伝導複合系での多彩な現象の観測、スピン三重項に限らず強相関電子系一般に適用可能な超伝導メカニズムの構築など、現代の超伝導研究の鍵となる基本概念に関しても、多くの新たな知見を獲得することが出来た。

また $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ におけるモット転移と軌道秩序の解明、 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ のメタ磁性臨界現象の発見、銀鉛酸化物の新超伝導体の発見など、関連物質系での研究成果も数多く挙げた。2004 年 10 月には京都大学で国際シンポジウム「スピン三重項超伝導とルテニウム酸化物の物理」を本研究で主催し、海外 8 カ国からの 23 名を含む約 100 名の参加で、当該分野で活躍中の研究者をほぼ一堂に集めて、成果発表と今後の研究展開についての集中的な議論をおこなった。以下では、主な成果についてさらに具体的に述べたあと、今後の発展についても展望する。

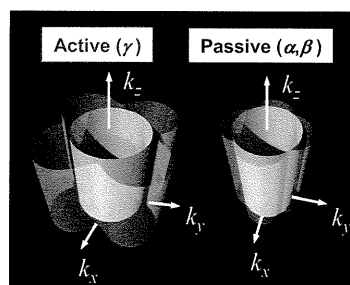
【主な研究成果】

3-1. Sr_2RuO_4 の超伝導

(1) 全てのバンドの超伝導ギャップ構造の確定

ベクトル型複合超伝導マグネットの回転装置と希釈冷凍機を組み合わせ、精確に方位制御した磁場中での比熱を 0.1 K 以下まで測定することにより、超伝導ギャップはフェルミ面（バンド）ごとに大きさ・異方性が異なることを明らかにした。その物理的要因についても、スピン三重項 p 波の対称性と一部のバンドの磁気揺らぎの効果で定性的・定量的に理解出来た。

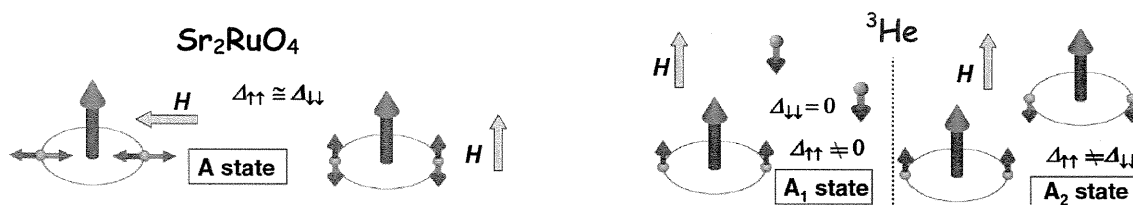
なお、電子軌道起源・対称性が異なる複数のフェルミ面（バンド）をもつ超伝導体では、バンドごとに超伝導ギャップの大きさや異方性、ギャップのノード構造が異なるという「マルチギャップ超伝導状態」が起こりうることは、この Sr_2RuO_4 の研究から決定的になった。この視点・認識は、従来型メカニズムによると考えられる MgB_2 の超伝導性の理解などにも大いに取り入れられている。また、本研究で開発したマグネット回転型の精密磁場方位制御装置は、今後、さまざまな物質の広範な物理量の測定や物性制御への利用において波及効果が期待される。



Sr_2RuO_4 の 2 種類のフェルミ面ごとの超伝導ギャップ構造

(2) 三重項スピン状態の決定

スピン一重項とは異なり、スピン三重項では超伝導状態でも電子スピンの自由度が生きているため、帯磁率の異方性がスピン対に関する重要な情報を与える。スピン帯磁率は核磁気共鳴（NMR）を用いた微視的プローブによるナイトシフトから得られる。 RuO_2 面平行の磁場中ではスピン成分が面内にあるような三重項状態であることが明らかになった（前頁図）。 RuO_2 面に垂直方向の超伝導臨界磁場は 0.075 テスラで、面平行に比べ 1/20 と非常に小さいため、通常の NMR 手法ではナイトシフトの測定は難しい。そこで核四重共鳴（NQR）で信号を観測しておき、さらに弱磁場を印加する新手法で測定を可能にした。その結果、電子対スピンはゼロ磁場では RuO_2 面内にあるが、印加磁場に応じて方向を変え、スピン異方性を生む相互作用が非常に弱いことも明らかになった。



Sr_2RuO_4 のスピン三重項超伝導と ^3He のスピン三重項超流動状態の秩序変数の比較

(3) 奇パリティの検証

Sr_2RuO_4 と従来型 s 波超伝導体の AuIn とのジョゼフソン接合ループの臨界電流測定から、「 π 接合 SQUID (超伝導量子干渉素子)」と呼ばれる半整数磁束の発生を観測した。この結果は Sr_2RuO_4 の超伝導波動関数が奇のパリティをもつことの直接的検証といえる。

(1)、(2)、(3)から上の図に模式的に示したように、スピンの RuO_2 面内で、軌道が時間反転対称性を破るカイラル状態の三重項超伝導状態を基底状態とすることが、多角的に確定できた。

(4) 超伝導内部自由度に基づく新奇現象

比熱や NMR 等から決まったスピン三重項状態では、 RuO_2 面平行磁場中で軌道状態の変化による 2 次相転移が出現すると予想される。実際、天谷健一氏 (北海道大学) らとの共同研究で、精密磁化測定からその存在が確認できた。これに加えて、面に極めて精確に平行に磁場をかけると、上部臨界磁場近傍でも超伝導転移が 2 段に分かれる新奇な現象を比熱・磁化率・熱伝導率から見出した。また、これと符合して、面平行磁場に限って上部臨界磁場が強く抑制されている。この現象のメカニズムはまだ十分理解されていないが、超伝導電子対のスピン偏極を伴うノンユニタリー状態の出現によるとの理論的解釈があり、今後更なる吟味が必要である。

(5) Sr_2RuO_4 の元素置換効果

Sr_2RuO_4 に、非磁性イオンの Ca (Sr サイト) や Ti (Ru サイト) を部分置換することにより Ru に基づく磁性が現れることを見出した。これらの系において Sr-NMR を行い、それぞれ強磁性ゆらぎ、反強磁性ゆらぎが増大されることを示した。また La (Sr サイト) を導入することによって、フェルミ面付近のバンドの電子数を増大させることができ、フェルミ面の大きさに変化をもたらし、特に超伝導に主要なガンマと呼ばれるフェルミ面が、電子ドーピングによって電子面からホール面に変化することを量子振動やホール効果から明らかにした。

(6) 強相関電子系の超伝導メカニズムの理論構築

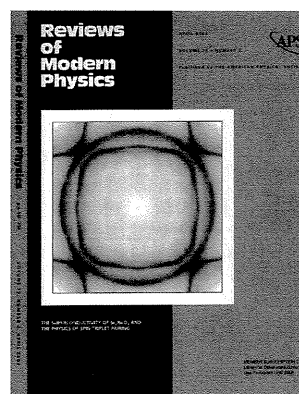
重い電子系物質や銅酸化物高温超伝導体など、多くの強相関電子系に見られる異方的超伝導のメカニズムについては、さまざまな理論が展開されているが、それらの超伝導に普遍的に適用できる理論体系の構築は、現在の凝縮系物理学にとって最重要な課題のひとつである。クーロン斥力効果が強すぎない場合、スピンの揺らぎに基づく理論も有力である。しかし、 Sr_2RuO_4 の場合、超伝導に主要ではないフェルミ面にはネスティングに基づく反強磁性的な磁気揺らぎがあるものの、その揺らぎは超伝導とはむしろ競合する。その一方で、超伝導に主要なフェルミ面には大きな磁気揺らぎが存在しないことから、磁気揺らぎを包括しつつ、それを超えた効果も取り入れた理論構築が要請されていた。

本研究において、ハバード・モデルを用いた 3 次の摂動計算により、クーロン斥力(強相関効果)による超伝導メカニズムを解明する理論の構築に成功した。従来型超伝導の機構にみられるような単一ボゾンの交換による電子間引力ではなく、電子の散乱初状態、終状態の波数に依存する高次の異方的相互作用に基づく過程が重要となる。特に Sr_2RuO_4 については、実験に準拠

した 3 バンドの電子構造をふまえて、強磁性的揺らぎによらず、クーロン斥力のもたらす電子間相互作用の波数依存性によって、超伝導電子凝縮に必要な引力が得られること、そしてスピン一重項 d 波状態よりも、スピン三重項 p 波状態が安定であることが理論的に導かれた。スピン三重項超伝導体について、このようなレベルでのミクロな超伝導機構理論を作ることに成功したのは初めての例といえる。

(7) 角度分解型光電子分光法 (ARPES) の表面敏感性と問題解決

Sr_2RuO_4 の研究を通じて、ARPESの表面敏感性を如実に示す問題点を明らかにし、その問題解決を行った。ARPESは超伝導体・磁性体を始めとして広範な物質の電子構造を決定する測定方法として、その技術進歩が著しいが、表面の電子構造を反映するため、バルクの物性量との対応付けに注意を要することは明らかであった。 Sr_2RuO_4 のフェルミ面に関してARPESでは、他の測定量と矛盾する結果が複数報告されていたが、これは結晶表面層の原子配列再構成が起こるためとわかった。そして表面処理の工夫によってARPESでもバルクの電子状態を反映したフェルミ面が観測可能になった。(Rev. Mod. Phys. **75**, 657-712 (2003)の関連図が同誌表紙に採用された。)



角度分解型光電子分光で決定した Sr_2RuO_4 のフェルミ面。

3-2. Sr_2RuO_4 を含む共晶系における超伝導

Sr_2RuO_4 とRu金属の共晶体では、両相の界面近傍で超伝導転移温度が Sr_2RuO_4 の約2倍の3 K程度にまで上昇することは本基盤研究発足以前に我々が見出していた。本研究では、バルク結晶のへき開面を利用したブレイク接合による準粒子トンネル効果、およびNTT物性科学基礎研究所との共同研究での、数 μm の大きさの共晶析出Ru片それぞれに電極を取り付けてのコンダクタンス測定での準粒子トンネル効果で、ゼロバイアス・コンダクタンスピーク (ZBCP) を観測した。これらは $\text{Sr}_2\text{RuO}_4/\text{Ru}$ 界面で、波動関数の位相に角度依存性をもつ異方的超伝導に特有のアンドレーフ束縛状態が形成されていることを意味し、3-K超伝導も異方的超伝導であることを示している。特に後者の実験では、ZBCPの現れる温度・磁場の範囲が、超伝導相の境界より内側にあることから、界面で超伝導の時間反転対称性の破れが生じ始める転移を検出している可能性を指摘した。

さらに Sr_2RuO_4 と遍歴メタ磁性体 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ との共晶の大型結晶育成にも成功した。この系から切り出した $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ では、本来超伝導を示さないはずの $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 部分にもかかわらず超伝導グレインが多数存在し、近接効果によるネットワーク形成で大きな反磁性シールド効果を示す結果が得られた。スピン三重項超伝導体と常伝導金属、あるいは従来型超伝導体との接合系での超伝導現象に関しては、ごく最近の進展が著しく、今後の成果が見込まれる分野である。

3-3. $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ における新しい量子臨界現象の発見

従来の量子臨界点は、何らかのパラメーターの変化によって2次相転移温度が絶対零度に至る点として定義してきた。これに対して、液相・気相境界のような1次相転移線の終点としての「臨界点」が何らかのパラメーターの変化によって絶対零度に至る点も量子臨界点と定義できることを実験的に初めて確実にし、理論的裏づけも行った。具体的には Sr_2RuO_4 に関連の常伝導金属 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ のメタ磁性1次相転移の終点を、印加磁場方向の制御によって絶対零度に抑制可能であることが示せた。そして「メタ磁性量子臨界現象」としての基底状態の理解を進めた。 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ は Sr_2RuO_4 と同様、極めて純良な単結晶が育成できるので、量子臨界現象の研究にとってひとつのモデル系となると期待される。

また、この物質で ^{17}O -NMRを行うことにより、臨界磁場での磁気励起の振る舞いを調べた。その結果、核スピン-格子緩和率を温度で割った $1/T_1T$ は、臨界磁場では低温まで増大を続け、 $T=0$ での臨界点の存在を実際に示すことがわかった。この振る舞いは、量子臨界点に対する理論的予想とよく一致する。また $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ では臨界磁場の上下で、同様のフェルミ液体状態が実現しており、臨界点の上下で相の異なる2次の量子臨界点とは性質が深く異なることも明らかにした。

3-4. $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ の強相関物性

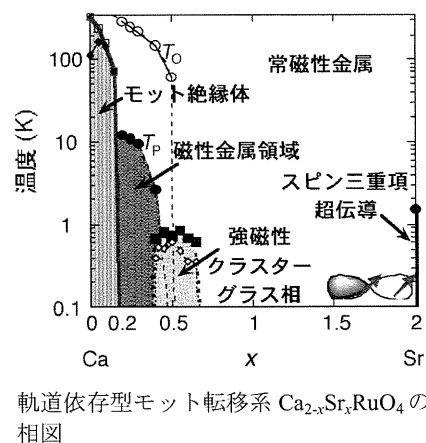
(1) Ca_2RuO_4 の絶縁体-金属転移と超伝導の探索

広島大学の中村文彦氏との共同研究で、モット絶縁体 Ca_2RuO_4 に1 GPa程度の静水圧を印加すると、構造の1次相転移を伴って残留抵抗率が $1\ \mu\Omega\text{ cm}$ もの小さな金属に変わり、同時に低温での反強磁性秩序相に替わって強磁性秩序相が出現することが明らかになった。さらに圧力を増すと8 GPa程度で強磁性秩序は2次転移ながら急速に消失する。これらの変化に伴って Ca_2RuO_4 でも超伝導が誘起できるのかどうか、研究を継続中である。

(2) 軌道依存型モット転移系 $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$

我々の開発したモット転移系 $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ において、我々のグループ、および、国内・海外との共同研究により、以下のことを明らかにした。

- (a) モット絶縁体状態における d_{xy} 軌道の強制的秩序と d_{xy}, d_{yz} による $S=1$ 反強磁性
- (b) モット転移近傍における強い局在によるホッピング伝導機構
- (c) モット転移($x=0.2$)近傍に現れる、酸化物で最も大きな有効質量($255\text{ mJ/mole-Ru K}^2$)を持つ



軌道依存型モット転移系 $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ の相図

つ重い電子フェルミ液体状態の存在

(d) その重い電子状態の磁場下でのメタ磁性転移による軌道整列

(e) $x = 0.5$ に現れる量子臨界点における d_{xy} バンドのファン・ホーベ特異点による強磁性的臨界状態と重い電子状態。

特に (e) は $x = 0$ におけるスピン 3 重項超伝導に対してその起源となる強磁性状態と超伝導を一つの相図のうえでつなぎ、機構を解明する上で重要である。以上のことは、モット転移系 $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ が軌道依存型モット転移系であることを明確に示している。

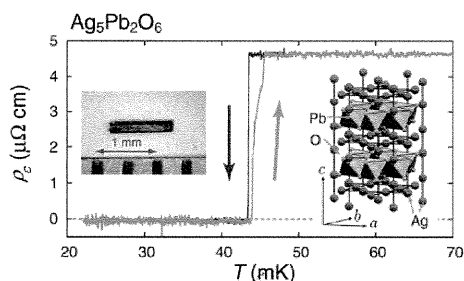
3-5. ルテニウム酸化物以外の酸化物の超伝導

(1) 銀鉛酸化物における第 1 種超伝導の発見

ルテニウム系と類似の遷移金属酸化物での新超伝導体探索の結果、層状構造の銀の酸化物では初めての超伝導を発見した。銀のカゴメ格子面と 1 次元鎖をもつ $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ で、その単結晶育成にも成功し、50 mK 以下で超伝導が出現することを明らかにした。さらに磁場中での超伝導転移のヒステリシスや中間状態の出現に伴う交流磁化率のピーク現象から、酸化物としては初めてとなる第 1 種超伝導体であることを示した。

銀は元素周期表で銅の真下に位置するが、銅酸化物の高温超伝導体とは電子状態が異なることが、共同研究の量子振動とバンド計算の研究も含めて

明らかになった。従来、Ag-Ag カゴメ格子面のような金属-金属結合では、金属の銀に類似の電子状態が実現していると考えられていた。しかしながら本研究で明らかになったことは、 $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ に関する限り、むしろ鉛の s 電子がフェルミ面に重要な寄与をしているということである。類似の貴金属酸化物の中には、PbO 層に対応する部分が強相関電子系を提供する関連物質もあり、関連の遷移金属酸化物における超伝導体探索の新しい指針が明確に浮かび上がってきた。



$\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ の超伝導転移を示す電気抵抗率。残留磁場の存在によるヒステリシスが見られる。左の写真は単結晶試料、右の図は層状の結晶構造を示す。

(2) 水和コバルト酸化物における超伝導と磁性

本研究課題期間中に、水和コバルト酸化物の超伝導が報告され、室町英治氏・桜井裕也氏（物材機構）、吉村一良教授（京大理学研究科化学）のグループと共同実験を始めた。Co 核の $1/T_1$ の振る舞いから、この超伝導体が強相関電子系物質で見られている異方的超伝導体であることを示した。またこの物質の常伝導状態の磁気相関は、高温超伝導体に見られた波数 $q=(\pi, \pi)$ を持つ強い反強磁性相関とは異なり、むしろ q の小さなゆらぎであることを指摘した。またこの超伝導体の T_c には水の含有量が重要であることを示し、様々な水の濃度の試料の測定から、この

物質の超伝導相は磁気相と接しており、強相関電子系超伝導に共通に見られる相図がこの超伝導体においても成り立っていることを明らかにした。実験的な物理量の核四重極共鳴周波数(Q)をパラメータに取りこの物質の相図を作り、この物質では CoO_2 block-layer の厚みが基底状態を決定付ける重要なパラメータであることを指摘した。この相図からコバルト酸化物の超伝導は、量子臨界磁気励起によって引き起こされている可能性を指摘した。

【今後の研究への発展性・課題】

Sr_2RuO_4 におけるスピン三重項超伝導が確立したことで、超流動ヘリウム3のスピン三重項状態や、冷却原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮など、これまで分野としては分かれていた（例えば日本物理学会では別々の「領域」に属していた）研究者との間で分野横断的・融合的な研究機運が生まれた。この流れはH17年度に発足した特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」(代表：福山寛)の形で研究組織に発展し、本基盤研究のメンバーも中心メンバーの中に取り込んで、既存の研究分野を超えての量子凝縮状態の研究が、発展しつつある。その中で、スピン三重項超伝導の物理の理解がさらに深まると同時に、本基盤研究の成果の関連分野への波及が進むものと期待できる。

スピン三重項超伝導体は、電荷・スピンの両自由度を備えた超流体である。それに特有の量子現象の開拓については今後、ますます活発な研究展開をみせることが確実である。最近、ヨーロッパを中心に、従来型超伝導体と強磁性金属との接合系の研究が急速な進展を遂げている。それに呼応して、スピン三重項超伝導体と常磁性金属、強磁性金属、あるいはスピン一重項超伝導体との間での接合系の超伝導現象の研究が、重要性を増していると考えられる。

4. 国際シンポジウム

「スピン三重項超伝導とルテニウム酸化物の物理 (STSR2004)」

The International Symposium:

"Spin-Triplet Superconductivity and Ruthenate Physics (STSR2004)"

ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 の超伝導が発見されてから、2004 年でちょうど 10 周年にあたる。この物質は従来のスピン一重項とは画期的に異なる、スピン三重項の超伝導体であることが確立された。またこの超伝導の研究から派生した、金属-絶縁体転移（モット転移）や量子臨界現象などの研究も大いに進展し、現代の固体物理学研究で中心的課題の一つである

「強相関電子系」の多様な物性を研究する上でも、ルテニウム酸化物が極めて適した物質群であることが明らかになった。

まさにこの時期に「ルテニウム酸化物」という焦点を絞った切り口で、本研究代表者の前野悦輝を会議組織委員として、2004 年の 10 月 25 日から 4 日間にわたり、京都大学百周年時計台記念館にて本研究主催の国際会議「スピン三重項超伝導とルテニウム酸化物の物理 (STSR2004)」を開催した。海外 8 カ国からの 23 名を含む 80 名以上の登録参加によって、この分野の物理学基礎研究の先端をになう実験・理論の主な研究者が結集でき、最新の研究動向を明確にするとともに未解決問題も浮き彫りにして、今後の研究の更なる展開に向けた指針作りを図ることができた。

会議のセッションに先立って 10 月 25 日にはウェルカム・リセプションを行い、翌 26 日以降は以下のようなテーマの招待講演セッションで会議を進行させた。

1. 10 月 26 日午前： Sr_2RuO_4 の超伝導
2. 10 月 26 日午後： スピン三重項超伝導の理論
3. 10 月 27 日午前： ルテニウム酸化物における金属-絶縁体転移と軌道秩序
4. 10 月 27 日午後： スピン三重項超伝導現象、Ca を含むルテニウム酸化物
5. 10 月 28 日午前： $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ におけるメタ磁性量子臨界現象
6. 10 月 28 日午後： ペロブスカイト構造以外のルテニウム酸化物、量子化磁束

34 件に上る口頭講演に加えて、ポスター発表者による短いポスター紹介の講演セッションも設けた。会議の内容については Proceedings 論文の様式でのアブストラクト集を刊行・配布した。

会議の具体的成果として、 Sr_2RuO_4 の超伝導状態については、電子対のスピン三重項性に加えて、軌道波導関数が奇パリティであることを決定付ける実験結果が発表され、初めてスピン・軌道両面から三重項超伝導状態を確証することができた。また超伝導エネルギーギャップの方向依存性の決定や、磁場中でのスピン対の向きの変化を示唆する結果も発表された。電子間の斥力相互作用がスピン三重項超伝導を引き起こすメカニズムについては、いろいろな立場・手法での成果が発表され、徹底的な議論を通じて、本質的な点についてはおそらく初めて多くの理論研究者の間で一致した見解が得られた。これは一線の研究者が一堂に会した中規模の国際会議ならではの大きな成果であった。

一方、金属-絶縁体転移に伴う電子構造の変化については、実験・理論ともにまだ合意が見られず、全容の解明に向けて解決すべき実験・理論両面での問題点が浮き彫りになった。メタ磁性量子臨界現象については低温で出現する新しい状態の理解に向けていくつかのモデルが提唱された。Ca を含むルテニウム酸化物の中では $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ に関する最近の研究の進展が目覚しく、最低温での 2 次元的な金属状態と磁場中での電子状態の著しい変化をめぐって、今後の一層の研究展開が期待できる。ペロブスカイト構造以外の様々なルテニウム酸化物を系統的に網羅した研究発表もなされ、



走査型トンネル顕微鏡を用いて微量不純物の作る興味深い電子状態を探る研究についても発表があった。

これら著しい研究成果の発表がなされたことは、この国際会議の大きな成果であるが、同時にルテニウム酸化物の様々な様相を研究する研究者が一堂に会し、直接議論を行うとともに、新たな共同研究の計画を含めて互いの親交を深めたことは、研究発表内容にひけをとらない極めて重要な成果であった。この会議でルテニウム酸化物における強相関電子系の物理を高い水準で討論できたことで、今後の研究展開にも大きな推進力となる。またこの会議の成果は、他の強相関電子系でもみられる異方的超伝導の統一的・普遍的な理解にも大いに貢献すると期待できる。さらに、ルテニウム酸化物の研究から明らかになった超伝導以外の新奇量子現象についても、それらをさらに広い物質系の研究に波及させるのに、この会議の成果が役立つものと期待でき、その学問的意義は大きいと考えられる。

ORAL SESSIONS in STSR2004 (25th Oct. - 28th Oct. 2004, Kyoto, Japan)

26th Oct. 2004 (Tue.)

9:30-9:40 (10) Opening

Session: Superconductivity of Sr_2RuO_4 , Chair: A. Mackenzie (Univ. of St. Andrews)

9:40-10:20 (40) T. M. Rice (26 A1) Unconventional Superconductivity: Cuprates vs. Ruthenates

10:20-10:50 (30) Y. Liu (26 A2) Phase-Sensitive Test of Odd Parity Superconductivity in Sr_2RuO_4

10:50-11:20 (30) K. Ishida (26 A3) Nuclear-Magnetic-Resonance Studies in Sr_2RuO_4

11:20-11:50 (30) Coffee Break

Session: Superconductivity of Sr_2RuO_4 , Chair: H. Aoki (Univ. of Tokyo)

11:50-12:20 (30) K. Deguchi (26 A4) Determination of the Superconducting Gap Structure of Sr_2RuO_4 from Field Orientation Dependence of the Specific Heat

12:20-12:50 (30) T. Nomura (26 A5) Microscopic Theory of p-wave Pairing Mechanism, Nodal Gap structure, and Orbital Dependent Superconductivity in Sr_2RuO_4

12:50-14:30 Lunch

14:30-15:30 (60) Poster Previews Chair: T. Ishiguro (Doshisha Univ.)

15:30-16:30 (60) Poster Session

16:30-17:00 (30) Coffee Break

Session: Mechanism of Spin-Triplet Pairing Chair: K. Yamada (Kyoto Univ.)

17:00-17:40 (40) K. Machida (26 P1) A Heavy Fermion Superconductor UPt_3

17:40-18:00 (20) C. Honerkamp (26 P2)

Magnetism and Superconductivity in the 2D Hubbard Model : A Renormalized Group Perspective

18:00-18:20 (20) M. Braden (26 P3) Magnetic Fluctuations in 214-Ruthenates

18:20-18:40 (20) Y. Yanase (26 P4) Effect of Spin-Orbit Coupling in the Pairing of Sr_2RuO_4

18:40-19:00 (20) K. Kuroki (26 P5) Spin-Triplet $px+py$ Pairing Induced by Off-Site Repulsion in Sr_2RuO_4

27th Oct. 2004 (Wed.)

Session: Metal-Insulator Transition and Orbital Physics, Chair: Y. Maeno (Kyoto Univ.)

9:30-10:00 (30) S. Nakatsuji (27 A1) Multi Band Mott Transition System $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$

10:00-10:20 (20) P. Steffens (27 A2) Coupling between Crystal Structure and Magnetic Instabilities in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$

10:20-10:40 (20) H. Ding (27 A3) ARPES Studies on $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$

10:40-11:00 (20) T. Mizokawa (27 A4) Electronic Structure on $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ Studied by Photoemission and X-ray Absorption Spectroscopy

11:00-11:30 (30) Coffee Break

Session: Metal-Insulator Transition and Orbital Physics Chair: M. Braden (Univ. of Koln)

11:30-12:00 (30) Z. Fang (27 A5) Orbital Physics in Ruthenates: First-Principles Studies

12:00-12:20 (20) N. Kawakami (27 A6)

Orbital-Selective Mott Transitions in Multi-Band Correlated Electron Systems

12:20-12:40 (20) Poster Previews Chair: K. Ishida (Kyoto Univ.)

12:40-14:30 Lunch

14:30-16:30 (120) Poster Session

16:30-17:00 (30) Coffee Break

Session: Spin-Triplet Phenomena/ Ca-Based Ruthenates, Chair: H. Yaguchi (Kyoto Univ.)

17:00-17:30 (30) Y. Tanaka (27 P1) Anomalous Charge Transport in Triplet Superconductor Junctions

17:30-17:50 (20) Z. Q. Mao (27 P2) Andreev Surface Bound State of Superconducting Phases in Sr_2RuO_4

17:50-18:10 (20) F. Nakamura (27 P3) Pressure-induced Mott Transition in Ca_2RuO_4

18:10-18:30 (20) G. Cao (27 P4) Orbital Physics: Mott Transition, Quantum Oscillations and Colossal Magnetoresistance in Bilayered $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$

18:30-18:50 (20) Y. Yoshida (27 P5) The electronic state and structural study of $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$

19:00-21:00 Banquet

28th Oct. (Thu.)

Session: Metamagnetic Quantum Criticality and Fermi Surface, Chair: N. Nagaosa (Univ. of Tokyo)

9:30-10:10 (40) G. G. Lonzarich (28 A1)

First and Second Order Quantum Phase Transitions in Itinerant-Electron Ferromagnets

10:10-10:40 (30) A. P. Mackenzie (28 A2) Magnetic Quantum Criticality and Phase Formation in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$

10:40-11:00 (20) A. Schofield (28 A3) Magnetic Field Driven Quantum Criticality

11:00-11:30 (30) Coffee Break

Session: Metamagnetic Quantum Criticality and Fermi Surface, Chair: A. Mackenzie (Univ. of St. Andrews)

11:30-12:10 (40) D. Singh (28 A4) Spin Fluctuations, Magnetism and Superconductivity in Ruthenates and Related Oxides

12:10-12:40 (30) Z. X. Shen (28 A5) Recent ARPES Results from Sr_2RuO_4 and Its Related Materials

12:40-13:00 (20) C. Bergemann (28 A6) The Fermi Surface of Sr_2RuO_4 and Its Evolution under Pressure and with Electron Doping

13:00-14:30 Lunch

Session: Non-Perovskite Ruthenates Chair: T. Fujita (Hiroshima Univ.)

14:30-15:00 (30) P. G. Khalifah (28 P1) Diversity of the La-Ru-O Phases

15:00-15:20 (20) M. Sato (28 P2) NMR and Other Kinds of Studies on Several Ru Oxides

15:20-15:50 (30) K. Kadowaki (28 P3)

High T_c Rutheno-Cuprate Superconductors $\text{RuSr}_2\text{RECu}_2\text{O}_8$ and $\text{RuSr}_2\text{RE}_{2-x}\text{Ce}_x\text{Cu}_2\text{O}_{10}$ ($\text{RE}=\text{Gd}$): Materials Issues

15:50-16:20 (30) T. W. Noh (28 P4)

Optical Investigation on the Metal-insulator Transition of the Pyrochlore Ruthenates

16:20-16:50 (30) Coffee Break

Session: Vortices and Nanostructure Chair: K. Machida (Okayama Univ.)

16:50-17:20 (30) D. Agterberg (28 P5) Role of Magnetic Fields on Spin-Triplet Superconductors

17:20-17:40 (20) K. Hasselbach (28 P6)

Observation of vortex coalescence in Sr_2RuO_4 by micro-SQUID microscopy

17:40-18:00 (20) H. Takagi (28 P7) Local Electronic States of Bilayer Ruthenates Studied by STM/STS

18:00-18:20 (20) Closing

POSTER SESSIONS in STSR2004 (25th Oct. - 28th Oct. 2004, Kyoto, Japan)

PS-01: Anisotropic antiferromagnetic spin fluctuations in Sr_2RuO_4

Hazuki Furukawa (Ochanomizu Univ.)

PS-02: ^{101}Ru -Knight Shift Measurement Under Magnetic Field Parallel to the c Axis in the Superconducting State of Sr_2RuO_4

Hiroshi Murakawa (Kyoto Univ.)

- PS-03: Effect of Spin-Orbit Interaction in Spin-Triplet Superconductor: Structure of d -vector and Anomalous ^{17}O -NQR Relaxation in Sr_2RuO_4
Kazumasa Miyake (Osaka Univ.)
- PS-04: Spin-triplet superconductivity induced by coexistence of spin and charge fluctuations in Sr_2RuO_4
Seiichiro Onari (Univ. of Tokyo)
- PS-05: Theory of isotope effect of superconductivity in the compounds Sr_2RuO_4
Hiroshi Shimahara (Hiroshima Univ.)
- PS-06: Roles of orbital degeneracy on the superconductivity in Na_xCoO_2 and comparison with Ruthenate superconductor
Yuuichi Yanase (Univ. of Tokyo)
- PS-07: Exact Unconventional-Pairing States on a Triangular Lattice
Masanori Yamanaka (Nihon Univ.)
- PS-08: Tunneling properties at the interface between superconducting Sr_2RuO_4 and a Ru micro-inclusion
Minoru Kawamura (RIKEN)
- PS-09: Investigation of Sr_2RuO_4 -Ru Junctions with Micro-electrodes in the 3-K Phase
Keiichi Takizawa (Kyoto Univ.)
- PS-10: The eutectic system of Sr_2RuO_4 - $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$
Shinji Fusanobori (Kyoto Univ.)
- PS-11: Anomalous Charge Transport in Triplet Superconductor Junctions
Yukio Tanaka (Nagoya Univ.)
- PS-12: Josephson interferometer as a symmetry probe of Sr_2RuO_4
Yasuhiro Asano (Hokkaido Univ.)
- PS-13: Tunneling effect of chiral superconductor
Daigo Tamura (Tohoku Univ.)
- PS-14: Theoretical study on the vortex lattice in multi-band superconductors
Noriyuki Nakai (Kyoto Univ.)
- PS-15: Vortex and domain structure in a chiral p -wave superconductor
Masanori Ichikawa (Okayama Univ.)
- PS-16: High magnetic field as a tool for studying metamagnetism and orbital physics in ruthenates
Luis Balicas (National High Magnetic field Laboratory)
- PS-17: Competing magnetic instabilities in 214-ruthenates
Paul Steffens (Univ. of Koln)
- PS-18: Optical Investigation on the Metal-insulator Transition of the Multi-band System $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$
Lee Jongseok (Seoul National Univ.)
- PS-19: Uniaxial Pressure Induced Ferromagnetism in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$
Shin-ichi Ikeda (AIST)
- PS-20: Multiple metamagnetic transitions in $\text{S Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ for the field
Robin Perry (Univ. of St. Andrews)
- PS-21: ^{17}O -NMR study on a metamagnetic quantum critical point of $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$
Kentaro Kitagawa (Kyoto Univ.)
- PS-22: Impurity-induced transition to a Mott insulator in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$
Roland Mathieu (Tokura Project (ERATO-SSS/JST))
- PS-23: Unusual Oscillation in Tunneling Magnetoresistance near a Quantum Critical Point in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$
Zhiqiang Mao and Joseph Hooper (Tulane Univ.)
- PS-24: STM/STS on $\text{Ca}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ and $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$
Katsuya Iwaya (RIKEN)
- PS-25: Quantum criticality in triple-layer ruthenate $\text{Sr}_4\text{Ru}_3\text{O}_{10}$
Zhiqiang Mao and Joseph Hooper (Tulane Univ.)
- PS-26: Study of superconductivity and magnetism in magnetic high- T_c superconductor $\text{RuSr}_2\text{RE}_{2-x}\text{Ce}_x\text{Cu}_2\text{O}_{10}$ and high temperature phase analyses
Kazuo Kadowaki (Tsukuba Univ.)
- PS-27: A novel heavy-fermion state in $\text{CaCu}_3\text{Ru}_4\text{O}_{12}$
Wataru Kobayashi (Waseda Univ.)
- PS-28: Structures and Magnetic Properties of Novel A-Ru-O Ruthenates (A=Ba,Sr) With non-Perovskite Type Structure
Hirohiko Sato (Chuo Univ.)
- PS-29: Crystal structure and magnetism of novel sodium ruthenate
Masahiro Shikano (National Inst. of Advanced Industrial Sci. and Tech. (AIST))
- PS-30: Giant magnetodielectric response of Ru-doped charge ordered manganites
Mahendiran Ramanathan (Tokura Project (ERATO-SSS/JST))

5. 科学賞の受賞 (List of Awards) (April 2001-March 2006)

第 16 回 (2002 年度) 日本 IBM 科学賞 (Japan IBM Science Award)

「スピン三重項の超伝導の発見とその物性解明」：前野悦輝

物理、化学、コンピューターサイエンス、エレクトロニクスの基礎研究の幅広い分野で優れた研究活動を行っている、国内の大学あるいは公的研究機関に所属している 45 歳以下の研究者から選定。

第 1 回 (2004 年度) トムソン・リサーチフロント賞 (Thomson Research Front Award)

「スピン三重項超伝導の発見と物性解明」：前野悦輝

1998 - 2003 年の 6 年間の論文引用情報の分析に基づき、今後大きな発展が見込まれる先端重要研究テーマの中で、日本人個人がその中心的役割を担っている 13 件について選定されたもので、物理学分野では唯一の受賞であった。

第 5 回 (2004 年度) 大和エイドリアン賞 (Daiwa-Adrian Award)

「ルテニウム酸化物と銅酸化物における新量子相」：

前野悦輝 - Andrew P. Mackenzie (Univ. St. Andrews) の研究チーム。

石田憲二、中辻知、中村文彦、池田伸一、菊川直樹、Santiago Grigera, Stephen Julian, Robin Perry, Rodolfo Borzi, Christoph Bergemann が共同受賞

顕著な研究業績を挙げた日・英の共同研究チーム対して 3 年毎に選定されるもので、2004 年度の受賞 6 件の中での最高賞に選ばれた。

井上研究奨励賞 (Inoue Research Award for Young Scientists)

理学、医学、薬学、工学、農学等の分野で過去 3 年の間に博士の学位を取得した 35 歳未満の研究者で、優れた博士論文を提出した若手研究者に対し毎年 30 名に贈呈される。本研究にかかわった博士課程修了生のうち 3 名が受賞した。

(参考) 第 17 回 (平成 12 年度)

棕田 秀和、大阪大学 (現職：大阪大学大学院・基礎工学研究科・助教授)

「ルテニウム酸化物における磁性と超伝導－核磁気共鳴法による研究－」

第 18 回 (平成 13 年度)

中辻 知、京都大学 (現職：京都大学大学院・理学研究科・講師)

「擬 2 次元モット転移系 $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ 」

第 22 回 (平成 17 年度)

出口和彦、京都大学 (現職：名古屋大学大学院・理学研究科・助手)

「スピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 の超伝導ギャップ構造の完全決定」

6. 講演リスト (List of Presentations)

6-1. 国際会議・研究会

前野悦輝

2001

“Towards the full characterization of the superconducting order parameter of Sr_2RuO_4 ”, (招待講演)

The 6th International Conference on Spectroscopies of Novel Superconductors (SNS 2001), May 13-17, 2001, Chicago, USA.

“Limiting of H_{c2} and the superconducting double transitions in Sr_2RuO_4 ”, (招待講演)

The 2nd International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides, August 23-25, 2001, Sendai, Japan.

“Introduction to the Mechanism and Symmetry of the Superconductivity of Sr_2RuO_4 ”, (招待講演)

Gordon Research Conference on Superconductivity, September 9-14, 2001, Queen's College, Oxford University, Oxford, UK.

“Spin-Triplet Superconductivity of Sr_2RuO_4 ”, (招待講演)

NATO Advanced Research Workshop on New Trends in Superconductivity, September 16-22, 2001, Yalta, Ukraine.

“Multiple Superconducting Phases of Sr_2RuO_4 ”, (招待講演)

Todai International Symposium ISSP-Kashiwa 2001 on Correlated Electrons (ISSP-8), October 2-5, 2001, Kashiwa, Japan.

“Towards the Full Characterization of the Spin-Triplet Superconductivity of Sr_2RuO_4 ”, (招待講演)

Ordering Phenomena in Transition Metal Oxides, October 7-10, 2001, Kloster Irsee, Germany.

“Toward the Full Determination of the Superconducting Order Parameter of Sr_2RuO_4 ”, (基調講演)

Ruthenates and Rutheno-Cuprates: Theory and Experiments, October 25-27, 2001, Vietri sul Mare (Salerno), Italy.

2002

“Superconducting Order Parameter of Sr_2RuO_4 : an Experimental Overview”, (招待講演)

The 23rd International Conference on Low-Temperature Physics (LT23), August 20-27, 2002, Hiroshima, Japan.

2003

“Unconventional Superconductivity of Sr_2RuO_4 ”, (招待講演)

The 7th APCTP Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, February 19-22, Muju, Korea.

“Magnetic Frustrations in Pyrochlore Oxides”, (招待講演)

The 7th APCTP Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, February 19-22, Muju, Korea.

“New Experimental Progress on the Superconductivity of Sr_2RuO_4 ”, (基調講演)

International Conference on Material and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors,

(M2S), May 25-30, 2003, Rio de Janeiro, Brazil.

“Metamagnetic Quantum Criticality in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ ”, (招待講演)

The 3rd International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides (TMO2003), November 8, 2003, Sendai, Japan.

2004

“Metamagnetic Quantum Criticality in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ ”, (招待講演)

International Symposium on Transition-Metal Oxides,
Jan 25, 2004, Sendai, Japan.

“Unconventional Superconductivity of Sr_2RuO_4 ”, (招待講演)

CIAR (Canadian Institute for Advanced Study), Summer School, May 28, 2004, Toronto, Canada.

“Magneto-Dielectric Response of Spin Ice and a Brief Report of the Japan Phys. Soc. (JPS) Spring Meeting”, (招待講演)

CIAR Quantum Materials Program Meeting, May 29, 2004, Toronto, Canada.

“Determination of the Gap Structures of Unconventional Superconductors from Specific Heat”, (招待講演)

Gordon Research Conference, Mount Holyoke College, June 20, 2004, Massachusetts, USA.

“Outstanding Issues on the Superconductivity of Sr_2RuO_4 ”, (招待講演)

Yukawa International Seminars (YKIS) 2004 Physics of Strongly Correlated Electron Systems,
Yukawa Institute for Theoretical Physics, November 1, 2004, Kyoto, Japan.

“Spin-Triplet Superconductivity of Sr_2RuO_4 : a Comparison with ^3He ”, (招待講演)

ISSP9, Institute for Solid State Physics, November 16, 2004, Kashiwa, Japan.

2005

“Novel Quantum Phenomena of Spin-Triplet Superconductivity”, (招待講演)

International Workshop on the Physics of Superconducting Phase Shift Devices,
April 2-5, 2005, Ischia, Italy.

“Newly Discovered Superconductivity in the Layered Silver Oxide $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$ ”, (招待講演)

International Workshop on Novel Electronic Materials,
April 25-27, 2005, University of Kentucky, USA.

“Field-Induced Transition on the Triangular Plane in the Spin-Ice $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ”,

International Conference on Low Temperature Physics (LT24),
August 10-16, 2005, Orland, Florida, USA.

「 Sr_2RuO_4 を含む共晶系でのスピン三重項近接効果」, (招待講演)

京都大学基礎物理学研究所 短期研究会

「異方的超伝導現象の統一的理解を目指して」, 2005年12月6-8日.

2006

“Superconductivity in Layered Oxides without Copper”, (招待講演)

International Symposium in Honor of J.G. Bednorz and K.A. Müller,
March 26-29, 2006, Zurich (Switzerland).

石田憲二

2002

"²⁷Al-Knight Shift Measurement on Heavy-Fermion Superconductor UNi₂Al₃",

The 23rd International Conference on Low-Temperature Physics (LT23),

August 20-27, 2002, Hiroshima, Japan.

"Spin Fluctuations on YbRh₂Si₂ in the Vicinity of a Quantum-Critical Point Revealed by ²⁹Si NMR",

The 23rd International Conference on Low-Temperature Physics (LT23),

August 20-27, 2002, Hiroshima, Japan.

"Ferromagnetic Correlations in Ca-doped Sr₂RuO₄: ⁸⁷Sr-NMR study", (招待講演)

International Conference on Physics and Chemistry of Molecular and Oxide Superconductors, MOS2002,

August 13-18, 2002, Hsinchu, Taiwan.

2003

"Spin fluctuations in YbRh₂Si₂ probed by Si NMR and mSR: Field-Induced Quantum Criticality", (招待講演)

Workshop on "Orbital Ordering and Fluctuations in d- and f-electron Systems", February 17-19, 2003, Tokai, Japan.

"Unconventional Superconductivity and Nearly Ferromagnetic Spin Fluctuations in Na_xCoO₂·yH₂O",

The 3rd International Workshop "Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides" and The 1st Asia-Pacific Workshop on "Strongly Correlated Electron Systems", November 5-8, 2003, Sendai, Japan.

"c-axis Knight Shift Measurement in the Superconducting State of Sr₂RuO₄",

The 3rd International Workshop "Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides" and The 1st Asia-Pacific Workshop on "Strongly Correlated Electron Systems", November 5-8, 2003, Sendai, Japan.

"Studies on Spin-Triplet Superconductor Sr₂RuO₄", (招待講演)

3rd International Symposium on New Developments in Strongly Correlated Electron Phase under Multiple Environment, February 20-22, 2003, Osaka, Japan.

"Spin Fluctuations in YbRh₂Si₂ probed by a Si-NMR study: Field-Induced Quantum Criticality", (招待講演)

American Physical Society Meeting, March 3, 2003, Austin Texas, USA.

2004

"Co-NQR Study in Superconducting Na_xCoO₂·yH₂O and Related compounds",

YKIS 2004 Physics of Strongly Correlated Electron Systems, November 2, 2004, Kyoto, Japan.

"Nuclear-Magnetic Resonance Studies in Sr₂RuO₄",

October 25, 2004, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto University, Kyoto, Japan.

"NMR in Sr₂RuO₄", (招待講演)

Japan-French Colloquium "Quantum complex systems",

July 21-24, 2004, ILL, Grenoble, France.

"NMR Studies in Ruthenates", (招待講演),

2004 St. Andrews Workshop on Correlated Electrons and Complexity, August, 2004, St. Andrews, UK.

「重い電子化合物 YbRh_2Si_2 における磁気量子臨界点近傍の磁気励起」, (特別講演)
日本物理学会第 59 回年次大会 (九州大学箱崎キャンパス, 2004 年 3 月 27 日)

2005

“NMR Studies in Strongly Correlated Electron System”, (招待講演)

Osaka/Grenoble Summer School, Heavy-Fermion Matter,
July 19- 23, 2005, Grenoble, France.

“Phase Diagram in Bilayered-Hydrate $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ Revealed by Co Nuclear Quadrupole Resonance”,

International Conference of Strongly Correlated Electron System (SCES'05),
July 26-30, 2005, Vienna, Austria.

“Magnetic Correlations and Superconductivity in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ”, (招待講演)

Complex Behavior in Correlated Electron Systems, August 1-18, 2005, Leiden, Holland.

「水和物コバルト酸化物超伝導体の Co-NMR、NQR」, (招待講演),

京都大学基礎物理学研究所 短期研究会

「異方的超伝導現象の統一的理解を目指して」, 2005 年 12 月 6-8 日

2006

“NMR Studies of Superconducting Cobaltate”, (招待講演)

Gordon Research Conference (Superconductivity) , January 22-27, 2006, Santa Ynez Vally, USA.

矢口 宏

2002

“Field-Temperature Phase Diagram of the 3-K Phase of Sr_2RuO_4 ”,

The 23rd International Conference on Low Temperature Physics, August 20-27, 2002, Hiroshima, Japan.

2003

“Spin-Triplet Superconductivity in Sr_2RuO_4 and Its Eutectic $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-Ru}$ ”, (招待講演)

3rd International Symposium on New Developments in Strongly Correlated Electron Phase under Multiple Environment, February 20-22, 2003, Osaka, Japan.

“Recent Developments in the 3-Kelvin Phase of Sr_2RuO_4 ”, (招待講演)

7th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors, May 25-30, 2003, Rio de Janeiro, Brazil.

2005

“Superconductivity in Eutectic of Ruthenates”, (招待講演)

2005 St. Andrews Workshop on Correlated Electrons and Complexity,
June 27- July 1, St. Andrews, UK.

2006

“Tunnelling Spectroscopy on S/N Junctions of the Unconventional Superconductor Sr_2RuO_4 and Ru Built in Eutectic”, (口頭発表)

International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006, February 27-March 2, 2006, Atsugi, Kanagawa, Japan.

中辻 知

2001

“Ferromagnetic and structural instabilities in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ”, (招待講演)
Physical Phenomena at High Magnetic Field IV, October, 2001, Santa Fe, USA.

2002

“Magnetic frustration and criticality at the structural instability in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$: a possible quantum phase transition”, (招待講演)
American Physical Society March Meeting, March, 2002, Indianapolis, USA.

“Magnetic frustration and criticality at the structural instability in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$: the role of the orbitals”, (招待講演)
“Orbital ordering and fluctuations d - and f -electron systems”, March, 2002, Tokai, Japan.

“Outstanding Issues in Unconventional Superconductivity and Magnetism in CeMIn_5 : Intersite coupling effects in CeCoIn_5 ”, (招待講演)
Institute for Complex Adaptive Matter (ICAM) International Workshop, December, 2002, Santa Fe, USA.

2003

“Intersite coupling effects in the Kondo lattice near an antiferromagnetic instability”, (招待講演)
American Physical Society March Meeting, March, 2003, Austin, USA.

“Intersite coupling effects in a Kondo lattice near an antiferromagnetic instability”, (招待講演)
Lorentz Center International Workshop “Non-Fermi Liquid Behavior and Quantum Phase Transitions”, May, 2003, University of Leiden, Holland.

「モット転移系(Ca,Sr) $_2\text{RuO}_4$ における軌道と重い電子状態」, (招待講演)
青山学院大学 理工学部, 第1回COEワークショップ「強相関係材料の新しい展開」
(青山学院大学, 2003年7月)

2004

“Orbital dependent magnetism and possible Kondo effects in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ”, (招待講演)
Physics in borides and other materials, March, 2004, Maui, USA.

“Multi-Band Mott Transition System $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ”, (招待講演)
International Symposium on Spin-Triplet Superconductivity and Ruthenate Physics,
October, 2004, Kyoto, Japan.

“Frustrated Spins in a Metallic Pyrochlore”,
International Workshop on Novel Quantum Phenomena in Transition Metal Oxides,
November, 2004, Sendai, Japan.

2005

“Metallic spin-liquid behavior of a pyrochlore Kondo lattice”, (招待講演)
Lorentz Center International Workshop “Complex Behavior in Correlated Electron Systems”,
August, 2005, University of Leiden, Holland.

2006

“Spin disordered state of the triangular lattice antiferromagnet NiGa_2S ”,
American Physical Society March Meeting, March, 2006, Baltimore, USA.

6-2. 国内学会

2002 年秋 秋季大会 9 月 6-9 日 (中部大学)

圧力で誘起された強磁性金属: Ca_2RuO_4 の圧力効果

中村文彦, 妹尾雄一, 伊藤昌和, 鈴木孝至, Patricia Alireza, Stephen Julian, 深澤英人, 前野悦輝

共鳴 X 線散乱による Ca_2RuO_4 の軌道秩序観測

久保田正人, 水牧仁一郎, 大隅寛幸, 池田直, 中辻知, 深澤英人, 前野悦輝, 村上洋一

実験の現状

前野悦輝

2003 年春 第 58 回年次大会 3 月 28-31 日 (東北大学川内キャンパス)

(Ca, Sr) $_2\text{RuO}_4$ の X 線光電子分光

Tran Thanh Trung, 黒川三奈子, 八木創, 溝川貴司, 藤森淳, 中辻知, 深澤英人, 前野悦輝

スピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 の c 軸方向ナイトシフトの測定

村川寛, 石田憲二, 北川健太郎, 毛志強, 前野悦輝

スピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 への電子ドーピング

菊川直樹, 前野悦輝

2003 年秋 秋季大会 9 月 20-23 日 (岡山大学津島キャンパス)

遍歴メタ磁性酸化物 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ における ^{17}O -NMR を用いた磁気状態の研究

北川健太郎, 石田憲二, R. S. Perry, 前野悦輝

比熱の磁場方向依存性でみた Sr_2RuO_4 の超伝導ギャップ構造

出口和彦, 菊川直樹, 毛志強, 前野悦輝

圧力誘起強磁性金属 Ca_2RuO_4 の低温物性

妹尾雄一, 中村文彦, 伊藤昌和, 鈴木孝至, Patricia Alireza, Stephen Julian, 深澤英人, 中辻知, 前野悦輝

Sr_2RuO_4 の極低温磁化測定

安田慎吾, 為安圭介, 横山淳, 天谷健一, 網塚浩, 出口和彦, 前野悦輝

2004 年春 第 59 回年次大会 3 月 27-30 日 (九州大学箱崎キャンパス)

Sr_2RuO_4 の極低温磁化測定 II

天谷健一, 安田慎吾, 為安圭介, 横山淳, 網塚浩, 出口和彦, 前野悦輝

Sr_2RuO_4 -Ru 共晶体における常伝導体/異方的超伝導体接合の電気伝導

川村稔, 矢口宏, 菊川直樹, 前野悦輝, 高柳英明

比熱測定による Sr_2RuO_4 の超伝導ギャップ構造の決定

出口和彦, 毛志強, 矢口宏, 前野悦輝

Sr_2RuO_4 における不純物効果の NQR, NMR 法による微視的測定

村川寛, 中井祐介, 石田憲二, 矢口宏, 菊川直樹, 滝沢恵一, 北川健太郎, 前野悦輝

$\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ のメタ磁性転移に伴う量子臨界性と多相現象

R. S. Perry, 田山孝, 前野悦輝, 北川健太郎, S. A. Grigera, R. A. Borzi, A. P. Mackenzie, 石田憲二, 榊原俊郎

遍歴メタ磁性酸化物 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ における ^{17}O -NMR を用いた量子臨界現象の研究

北川健太郎, 石田憲二, R. S. Perry, 村川寛, 井原慶彦, 前野悦輝

強磁性を基底状態に持つ圧力誘起 2 次元金属 Ca_2RuO_4 の低温物性

中村文彦, 妹尾雄一, 伊藤晶和, 鈴木孝至, Patricia Alireza, Stephen Julian, 深澤英人, 中辻知, 前野悦輝

光照射された $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ の光電子分光

Tran Thanh Trung, 平田玄, 田久保耕, 溝川貴司, 藤森淳, 中辻知, 深澤英人, 前野悦輝

$\text{Ca}_{1.8}\text{Sr}_{0.2}\text{RuO}_4$ におけるメタ磁性転移後の軌道秩序

相馬慎吾, 高阪勇輔, 市川広彦, 秋光純, 中辻知, 前野悦輝, 岩佐和晃, 松村武, 西正和

2004 年秋 秋季大会 9 月 12-15 日 (青森大)

遍歴メタ磁性酸化物 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ の ^{17}O -NMR を用いた量子臨界ゆらぎの観測

北川健太郎, 石田憲二, R. S. Perry, 前野悦輝

$\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ の遍歴メタ磁性: RuO_2 面に平行な磁場中での多段転移

Robin S. Perry, 田山孝, 北川健太郎, 榊原俊郎, 石田憲二, 前野悦輝

$\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ の特異なトンネル磁気抵抗振動

Joe Hooper, Zhiqiang Mao, Robin S. Perry, 前野悦輝

SQUID を用いた Sr_2RuO_4 における奇パリティ超伝導の直接検証

K. D. Nelson, Z. Q. Mao, Y. Liu, 矢口宏, 前野悦輝

圧力誘起 2 次元強磁性金属 Ca_2RuO_4 の低温物性 II

中村文彦, 妹尾雄一, 伊藤晶和, 鈴木孝至, Patricia Alireza, Stephen Julian, 深澤英人, 中辻知, 前野悦輝

2005 年春 第 60 回年次大会 3 月 24-27 日 (東京理科大野田キャンパス)

モット絶縁体 Ca_2RuO_4 の圧力誘起相転移と構造変化

中村文彦, 妹尾雄一, 安藤拓哉, 仲井龍志, 伊藤昌和, 鈴木孝至, P. Steffens, M. Braden, P. Alireza, G. G. Lonzarich, 中辻知, 前野悦輝

走査型の SQUID およびホールプローブによる Sr_2RuO_4 の磁束状態の観測

Per G. Bjornsson, 前野悦輝, Martin E. Huber, Kathryn A. Moler

共晶体を用いた Sr_2RuO_4 -Ru 接合の準粒子トンネル効果

滝沢恵一, 矢口宏, 前野悦輝, 川村稔, 目野誉喜, 赤崎達志, 仙場浩一, 高柳英明

$\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ の光電子分光

Tran Thanh Trung, 田久保耕, 溝川貴司, 中辻知, 深澤英人, 前野悦輝

スピン三重項超伝導の新量子現象 (シンポジウム講演)

前野悦輝

2005 年秋 秋季大会 9 月 19-22 日 (同志社大)

^{17}O -NMR を用いた $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ のメタ磁性量子臨界揺らぎの磁場方向依存性の研究

北川健太郎, 石田憲二, R. S. Perry, 前野悦輝

高大連携による超伝導転移温度測定実験の開発

小川雅史, 前野悦輝

モット絶縁体 Ca_2RuO_4 の多彩な圧力誘起相転移

中村文彦, 仲井龍志, 鈴木孝至, Patricia Alireza, Stephen Julian, G.G.Lonzarich, P.Steffens, M.Braden, 深澤英人, 中辻知, 前野悦輝

Sr_2RuO_4 - $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 共晶の超伝導性

房登真司, 橋高俊一郎, 矢口宏, 米澤進吾, 前野悦輝, R. Fittipaldi, A. Vecchione

異方的超伝導体 Sr_2RuO_4 の Little-Parks 振動

石井亮宇, 天谷健一, 網塚浩, 稲垣克彦, 丹田聡, 出口和彦, 前野悦輝

一軸性圧力下における Sr_2RuO_4 -Ru 共晶体の界面超伝導

矢口宏, 橋高俊一郎, 滝沢恵一, 前野悦輝

Sr_2RuO_4 の STM/STS 観測

神原浩, 新見康洋, 滝沢恵一, 矢口宏, 前野悦輝, 福山寛

Sr_2RuO_4 の極低温磁化測定 III

天谷健一, 横山淳, 網塚浩, 出口和彦, 前野悦輝

2006 年春 第 61 回年次大会 3 月 27-30 日 (愛媛大・松山大)

スピン 3 重項超伝導体 Sr_2RuO_4 の磁場中弾性率

森田晋也, 檜垣春弘, 石井勲, 伊藤昌和, 中村文彦, 鈴木孝至, Zhiqiang Mao, 前野悦輝

モット絶縁体 Ca_2RuO_4 の多彩な圧力誘起相転移 II

中村文彦, 仲井龍志, 伊藤晶和, 鈴木孝至, Patricia Alireza, Stephen Julian, G.G.Lonzarich, P.Steffens, M.Braden, 深澤英人, 中辻知, 前野悦輝

スピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 の RuO_2 面内平行低磁場中におけるナイトシフトの測定

村川 寛, 石田憲二, 北川健太郎, 毛志強, 前野悦輝

Sr_2RuO_4 - $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 共晶の $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 領域で観測される弱い超伝導

橋高俊一郎, 房登真司, 矢口宏, 米澤進吾, 前野悦輝, R.Fittipaldi, A.Vecchione

遍歴メタ磁性酸化物 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ の ^{17}O -NMR

北川健太郎, 石田憲二, R.S. Perry, 前野悦輝

レーザー励起光電子分光による $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ の電子状態の研究

下山田篤史, 津田俊輔, 石坂香子, 木須孝幸, 下志万貴博, 富樫格, 渡部俊太郎, C.T.Chen,
C.Zhang, 中辻知, 前野悦輝, 辛埴

Sr_2RuO_4 の STM/STS 観測 II

神原浩, 新見康洋, C. Winkelmann, 滝沢恵一, 矢口宏, 前野悦輝, 福山寛

7. 公表論文 (List of Publications)

7-1. Reviewまたは日本語解説

- (1-1) 核四重極共鳴(Co-NQR)から見たコバルト酸化物超伝導の物性,
石田憲二, 井原慶彦, 道岡千城, 吉村一良,
Forum of Superconductivity Science and Technology News **108**, 2-5 (Jan. 2006).
- (1-2) スピン三重項超伝導体ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 におけるトンネル効果,
矢口 宏, 前野悦輝, 川村 稔
固体物理 (特集号「超伝導接合の物理と応用」) **40**, No.10, 712-720 (Oct. 2005).
- (1-3) 多バンドをもつスピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 への元素置換効果,
菊川直樹, A.P. Mackenzie, 前野悦輝,
固体物理**40**, No. 2, 101-111 (Feb. 2005).
- (1-4) *The Superconductivity of Sr_2RuO_4 and the Physics of Spin-Triplet Pairing.*
A.P. Mackenzie and Y. Maeno,
Reviews of Modern Physics **75**, 657-712 (Apr. 2003).
- (1-5) 擬二次元モット転移系 $Ca_{2-x}Sr_xRuO_4$,
中辻知, 前野悦輝,
固体物理**38**, No.1, 41-48 (2003)
- (1-6) Sr_2RuO_4 のスピン・トリプレット超伝導,
前野悦輝,
パリティ編集委員会編 いままた高温超伝導, 丸善株式会社, 106-116. (2002.5.20)
- (1-7) 強相関電子系におけるスピン三重項超伝導 —NMR実験を中心として—
石田憲二、藤秀樹、北岡良雄
固体物理**38**, No.3, 179-199 (2003).
- (1-8) スピン三重項超伝導
前野悦輝、出口和彦、
日本物理学会誌 **56** (2001) 817-825.
- (1-9) *The Intriguing Superconductivity of Strontium Ruthenate,*
Y. Maeno, T.M. Rice, and M. Sigrist,
Physics Today **54** (2001) 42-47.
and its errata:
Authors Amend Article on Strontium Ruthenate
Y. Maeno, M. Sigrist, and T. M. Rice,
Phys. Today **54** (2001) 104-104.

7-2. Sr_2RuO_4

- (2-1) *Unusual Magnetic Response in Superconducting Mixed State of Sr_2RuO_4 ,*
K. Tenya, S. Yasuda, M. Yokoyama, H. Amitsuka, K. Deguchi, and Y. Maeno,
J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 023702 (Feb. 2006).
- (2-2) *Quantitative Analysis of Sr_2RuO_4 Angle-Resolved Photoemission Spectra: Many-Body Interactions in a Model Fermi Liquid,*
N.J.C. Ingle, K.M. Shen, F. Baumberger, W. Meevasana, D.H. Lu, Z.X. Shen, A. Damascelli, S. Nakatsuji, Z.Q. Mao, Y. Maeno, T. Kimura, and Y. Tokura,
Phys. Rev. B **72**, 205114 (Nov. 2005).
- (2-3) *Triplet Superconductors: Exploitable Basis for Scalable Quantum Computing,*
Kent S. Wood, Huey-Daw Wu, Frank F. Golf, Hiroshi Yaguchi, Yoshiteru Maeno, and Armen M. Gulian,
Proc. of Int. Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics in the Light of Quantum Computation, "Realizing Controllable Quantum States" eds. Hideaki Takayanagi and Junsaku Nitta, (World Scientific Publishing, 2005) pp. 343-348 (Aug. 2005).
- (2-4) *Scanning Magnetic Imaging of Sr_2RuO_4 ,*
Per G. Björnsson, Yoshiteru Maeno, Martin E. Huber, and Kathryn A. Moler,
Phys. Rev. B **72**, 012504-1-4 (Jul. 2005).
- (2-5) *Low-Temperature Hall Effect in Substituted Sr_2RuO_4 ,*
N. Kikugawa, A.P. Mackenzie, C. Bergemann, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **70**, 174501-1-5 (Nov. 2004).
- (2-6) *Odd-Parity Superconductivity in Sr_2RuO_4 ,*
K.D. Nelson, Z.Q. Mao, Y. Maeno, and Y. Liu,
Science **306**, 1151-1154 (Nov. 2004).
- (2-7) *Band-Selective Modification of the Magnetic Fluctuations in Sr_2RuO_4 : A Study of Substitution Effects,*
N. Kikugawa, C. Bergemann, A.P. Mackenzie, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **70**, 134520-1-7 (Oct. 2004).
- (2-8) *Measurement of the ^{101}Ru -Knight Shift of Superconducting Sr_2RuO_4 in a Parallel Magnetic Field,*
H. Murakawa, K. Ishida, K. Kitagawa, Z.Q. Mao, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **93**, 167004-1-4 (Oct. 2004).
- (2-9) *Toward Nano-Fabrication of Superconducting Ruthenate Qubits,*
K.S. Wood, J.S. Horwitz, H.D. Wu, S.S. Bounnak, H. Yaguchi, Y. Maeno, and A.M. Gulian,
Physica C **408-410**, 928-929 (Aug. 2004).
- (2-10) *Rigid-Band Shift of the Fermi Level in a Strongly Correlated Metal: $\text{Sr}_{2-y}\text{La}_y\text{RuO}_4$,*
N. Kikugawa, A.P. Mackenzie, C. Bergemann, R.A. Borzi, S.A. Grigera, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **70**, 060508-1-4 (Aug. 2004).
- (2-11) *Determination of the Superconducting Gap Structure in All Bands of the Spin-Triplet Superconductor Sr_2RuO_4 ,*
K. Deguchi, Z. Q. Mao, and Y. Maeno,
J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 1313-1321 (May 2004).
- (2-12) *Anisotropy of the Incommensurate Fluctuations in Sr_2RuO_4 : a Study with Polarized Neutrons,*
M. Braden, P. Steffens, Y. Sidis, J. Kulda, S. Hayden, N. Kikugawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **92**, 097402-1-4 (Mar. 2004).
- (2-13) *Field-Orientation Dependent Heat Capacity Measurements at Low Temperatures with a Vector Magnet System,*
K. Deguchi, T. Ishiguro, and Y. Maeno,
Rev. Sci. Instrum. **75** (5), 1186-1193 (May 2004).

- (2-14) *Gap Structure of the Spin-Triplet Superconductor Sr_2RuO_4 Determined from the Field-Orientation Dependence of the Specific Heat*,
K. Deguchi, Z. Q. Mao, H. Yaguchi, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **92**, 047002-1-4 (Jan. 2004).
- (2-15) *Gaplike Behavior of the c -axis Dynamic Conductivity in Pure and Ti-doped Sr_2RuO_4* ,
K. Pucher, A. Loidl, N. Kikugawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **68**, 214502-1-5 (Dec. 2003).
- (2-16) *STM Studies of Individual Ti Impurity Atoms in Sr_2RuO_4* ,
B. I. Barker, S. K. Dutta, C. Lupien, P. L. McEuen, N. Kikugawa, Y. Maeno, and J. C. Davis,
Physica B **329-333**, 1334-1335 (May 2003).
- (2-17) *Evolution of Normal-State Magnetic Fluctuations by Ca and Ti Substitutions in Sr_2RuO_4 : ^{87}Sr -NMR Study*,
K. Ishida, Y. Minami, Y. Kitaoka, S. Nakatsuji, N. Kikugawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **67**, 214412-1-6 (Jun. 2003).
- (2-18) *Preliminary Scanning Tunneling Spectroscopy Studies of Sr_2RuO_4* ,
H. Kambara, K. Yokota, T. Matsui, I. Ueda, T. Shishido, M. Wada, N. Kikugawa, Y. Maeno, and H. Fukuyama,
Physica C **388-389**, 503-504 (May 2003).
- (2-19) *Transverse Elastic Moduli in Spin-Triplet Superconductor Sr_2RuO_4* ,
N. Okuda, T. Suzuki, Z. Mao, Y. Maeno, and T. Fujita,
Physica C **388-389**, 497-498 (May 2003).
- (2-20) *Specific Heat of the Spin-Triplet Superconductor Sr_2RuO_4 with Nonmagnetic Impurities*,
N. Kikugawa and Y. Maeno,
Physica C **388-389**, 493-494 (May 2003).
- (2-21) *Magnetic Excitations in 214-Ruthenates*,
M. Braden, O. Friedt, Y. Sidis, P. Bourges, P. Pforty, S. Nakatsuji, Z. Mao, N. Kikugawa, M. Minakata, and Y. Maeno,
Physica C **388-389**, 489-490 (May 2003).
- (2-22) *Experimental Studies of the Pairing Symmetry in Sr_2RuO_4 : Single-Particle Tunneling, Josephson Effects, and Phase-Sensitive Measurements*,
K.D. Nelson, Z.Q. Mao, Y. Maeno, and Y. Liu,
Physica C **388-389**, 491-492 (May 2003).
- (2-23) *Superconducting Order Parameter of Sr_2RuO_4* ,
N. Kikugawa, K. Deguchi, and Y. Maeno,
Physica C **388-389**, 483-486 (May 2003).
- (2-24) *Tunneling and Phase-Sensitive Studies of the Pairing Symmetry in Sr_2RuO_4* ,
Y. Liu, K.D. Nelson, Z.Q. Mao, R. Jin, and Y. Maeno,
Journal of Low Temperature Physics **131**, 1059-1068 (Jun. 2003).
- (2-25) *Compton Scattering Study of the Electron Momentum Density in Sr_2RuO_4* ,
N. Hiraoka, A. Deb, M. Itou, Y. Sakurai, Z.Q. Mao, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **67**, 094511-1-5 (Mar. 2003).
- (2-26) *Out-of-Plane Charge Transport in the Normal State of Pure and Ti-doped Sr_2RuO_4* ,
K. Pucher, A. Loidl, N. Kikugawa, and Y. Maeno,
Acta Physica Polonica B **34** (2), 587-590 (Feb. 2003).
- (2-27) *Effect of In-Plane Impurity Substitution in Sr_2RuO_4* ,
N. Kikugawa, A. P. Mackenzie, and Y. Maeno,
J. Phys. Soc. Jpn **72**, 237-240 (Feb. 2003).
- (2-28) *The Millimetre-Wave Magneto-Optical Response of Sr_2RuO_4* ,
A. Ardavan, E. Rzepniewski, R.S. Edwards, J. Singleton, and Y. Maeno,
International Journal of Modern Physics B **16** (20-22), 3238-3243 (Aug. 2002).

- (2-29) *Electron Magnetic Resonance Fermi Surface Imaging: Applications to Organic Conductors and Sr_2RuO_4 ,*
S. Hill, A. Kovalev, M.M. Mola, C. Palassis, Z.Q. Mao, Y. Maeno, and J.S. Qualls,
International Journal of Modern Physics B **16** (20-22), 3109-3112 (Aug. 2002).
- (2-30) *Angular Dependence of Vortex States in Sr_2RuO_4 ,*
K. Yamazaki, M. Tokunaga, T. Tamegai, Z.Q. Mao, Y. Maeno, and S. Okayasu,
Physica C **378-381**, 537-540 (Oct. 2002).
- (2-31) *Magnetic Excitations in 214-Ruthenates,*
M. Braden, O. Friedt, Y. Sidis, P. Bourges, P. Pforty, and Y. Maeno,
Lecture Notes in Physics 603, 15-31 (2002).
- (2-32) *Evolution of Fermi-Liquid Interactions in Sr_2RuO_4 under Pressure,*
D. Forsythe, S.R. Julian, C. Bergemann, E. Pugh, M.J. Steiner, P.L. Alireza, G.J. McMullan, F. Nakamura, R.K.W. Haselwimmer, I.R. Walker, S.S. Saxena, G.G. Lonzarich, A.P. Mackenzie, Z.Q. Mao, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **89**, 166402-1-4 (Oct. 2002).
- (2-33) *Non-Fermi-Liquid Behavior in Sr_2RuO_4 with Nonmagnetic Impurities,*
N. Kikugawa and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **89**, 117001-1-4 (Sep. 2002).
- (2-34) *Detailed Study of the ac Susceptibility of Sr_2RuO_4 in Oriented Magnetic Fields,*
H. Yaguchi, T. Akima, Z. Mao, Y. Maeno, and T. Ishiguro,
Phys. Rev. B **66**, 214514-1-7 (Dec. 2002).
- (2-35) *Inelastic Neutron Scattering Study of Magnetic Excitation in Sr_2RuO_4 ,*
M. Braden, Y. Sidis, P. Bourges, P. Pfeuty, J. Kulda, Z.Q. Mao, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **66**, 064522-1-11 (Aug. 2002).
- (2-36) *Superconducting Double Transition and the Upper Critical Field Limit of Sr_2RuO_4 in Parallel Magnetic Fields,*
K. Deguchi, M. Tanatar, Z. Mao, T. Ishiguro, and Y. Maeno,
J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 2839-2842 (Dec. 2002).
- (2-37) *Direct Observation of the Superconducting Gap of Sr_2RuO_4 ,*
M.D. Upward, L.P. Kouwenhoven, A.F. Morpurgo, N. Kikugawa, Z.Q. Mao, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **65**, 220512-1-4 (Jun. 2002).
- (2-38) *Elastic Tensor of Sr_2RuO_4 ,*
J. Paglione, C. Lupien, W.A. MacFarlane, J.M. Perz, L. Taillefer, Z.Q. Mao, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **65**, 220506-1-4 (Jun. 2002).
- (2-39) *Electron Spin Dynamics in the Spin-Triplet Superconducting State of Sr_2RuO_4 : ^{17}O NQR Study,*
H. Mukuda, K. Ishida, Y. Kitaoka, K. Miyake, Z.Q. Mao, Y. Mori, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **65**, 132507-1-4 (Apr. 2002).
- (2-40) *Microwave Spectroscopy of Novel Superconductors,*
C.E. Gough, R.J. Ormeno, A. Sibley, M. Hein, S. NishiZaki, and Y. Maeno,
J. Phys. Chem. Solids **63**, 2187-2193 (Dec. 2002).
- (2-41) *Multiple Superconducting Phases of Sr_2RuO_4 ,*
H. Yaguchi, K. Deguchi, M. A. Tanatar, Y. Maeno, and T. Ishiguro,
J. Phys. Chem. Solids **63**, 1007-1011 (Jun.-Aug. 2002).
- (2-42) *Bulk Single-Crystal Growth Strontium Ruthenates by a Floating-Zone Method,*
S. Ikeda, U. Azuma, N. Shirakawa, Y. Nishihara, and Y. Maeno,
J. Cryst. Growth **237-239**, 787-791 (Apr. 2002).
- (2-43) *Electronic Structure of the Superconducting Layered Non-Cuprate Sr_2RuO_4 from 2D-ACAR Measurements,*
A. Hamid, A. Tanigawa, Z. Mao, and Y. Maeno,
Phys. Status Solidi B **231**, 149-156 (May 2002).
- (2-44) *Effect of Ti Substitution on the Residual Resistivity in the Spin-Triplet Superconductor Sr_2RuO_4 ,*

- N. Kikugawa, S. Saita, M. Minakata, and Y. Maeno,
Physica B **312-313**, 803-804 (Mar. 2002).
- (2-45) *Elastic Moduli of Unconventional Superconductor Sr_2RuO_4* ,
N. Okuda, T. Suzuki, Z. Mao, Y. Maeno, and T. Fujita,
Physica B **312-313**, 800-802 (Mar. 2002).
- (2-46) *Universal Heat Transport in Sr_2RuO_4* ,
M. Suzuki, M. A. Tanatar, N. Kikugawa, Z.Q. Mao, Y. Maeno, and T. Ishiguro,
Phys. Rev. Lett. **88**, 227004-1-4 (Jun. 2002).
- (2-47) *Incommensurate Magnetic Ordering in $Sr_2Ru_{1-x}Ti_xO_4$* ,
M. Braden, O. Friedt, Y. Sidis, P. Bourges, M. Minakata, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **88**, 197002-1-4 (May. 2002).
- (2-48) *Novel Quantum Order in the Ruthenates*,
A. Mackenzie, **Y. Maeno**, and S. Julian,
Physics World **15**, 33-38 (Apr. 2002).
- (2-49) *Unconventional Strain Dependence of Superconductivity in Spin-Triplet Superconductor Sr_2RuO_4* ,
N. Okuda, T. Suzuki, Z. Mao, Y. Maeno, and T. Fujita,
J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 1134-1139 (Apr. 2002).
- (2-50) *Thermoelectric Power of Sr_2RuO_4* ,
P. Zheng, Z. Chen, N. Wang, Y. Eang, Z. Mao, and Y. Maeno,
ACTA Phys. Sinica **51**, 655-658 (Mar. 2002).
- (2-51) *Quasi-Particle Density in Sr_2RuO_4 Probed by Means of the Phonon Thermal Conductivity*,
M. Suzuki, M. A. Tanatar, Z.Q. Mao, Y. Maeno, and T. Ishiguro,
J. Phys.: Condens. Matter **14**, 7371-7381 (Aug. 2002).
- (2-52) *Cyclotron Resonance in the Layered Perovskite Superconductor Sr_2RuO_4* ,
E. Rzepniewski, R.S. Edwards, J. Singleton, A. Ardavan, and Y. Maeno,
J. Phys.: Condens. Matter **14**, 3759-3774 (Apr. 2002).
- (2-53) *Toward the Full Determination of the Superconducting Order Parameter of Sr_2RuO_4* ,
Y. Maeno, H. Yaguchi, and K. Deguchi,
in Ruthenates and rutheno-cuprates: theory and experiments,
the Springer series Lecture Notes in Physics, **603**, 1-4 e, ds: M. Cuoco, and C. Noce,
(Springer-Verlag, 2002)
- (2-54) *Spin-Triplet Superconductivity of Sr_2RuO_4* ,
Y. Maeno,
"More is Different", Fifty Years of Condensed Matter Physics, edited by N. Phuan Ong and Ravin
N. Bhatt, Princeton Series in Physics, 135-149 (Dec. 2001).
- (2-55) *Surface Electronic Structure of Sr_2RuO_4* ,
K.M. Shen, A. Damascelli, D.H. Lu, N.P. Armitage, F. Ronning, D.L. Feng, C. Kim, Z.-X. Shen,
D.J. Singh, I.I. Mazin, S. Nakatsuji, Z.Q. Mao, Y. Maeno, T. Kimura, and Y. Tokura,
Phys. Rev. B **64**, 180502-1-4 (Nov. 2001).
- (2-56) *Normal-State Spin Dynamics in the Spin-Triplet Superconductor Sr_2RuO_4* ,
K. Ishida, H. Mukuda, Y. Minami, Y. Kitaoka, Z.Q. Mao, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **64**, 100501-1-4 (Sep. 2001).
- (2-57) *Band Reflection and Surface Reconstruction in Sr_2RuO_4* ,
H. Ding, S. Wang, H. Yang, T. Takahashi, J. Campuzano, and Y. Maeno,
Physica C **364**, 594-599 (Nov. 2001).
- (2-58) *Electron Magnetic Resonance Imaging of the Fermi Surface of Sr_2RuO_4* ,
C. Palassis, M. Mola, S. Hill, J. Brooks, Y. Maeno, and Z. Mao,
Physica C **364**, 386-391 (Nov. 2001).
- (2-59) *The c-axis Magnetoresistance Study in the Normal-State Sr_2RuO_4* ,
Z.C. Guo, P. Zheng, N.L. Wang, Z.J. Chen, Y. Maeno, and Z.Q. Mao,

- Acta Physica Sinica **50**, 1824-1828 (Sep. 2001).
- (2-60) *Ru-Knight Shift Measurement in the Superconducting State of Sr_2RuO_4* ,
K. Ishida, H. Mukuda, Y. Kitaoka, Z. Q. Mao, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
J. Magn. Magn. Mater **226**, 353-354 (May 2001).
- (2-61) *Ultrasound Attenuation Sr_2RuO_4 : An Angle-Resolved Study on the Superconducting Gap Function*,
C. Lupien, W. A. McFarlane, C. Proust, L. Taillefer, Z. Q. Mao, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **86**, 5986-5989 (Jun. 2001).

BEFORE 基盤 S

- (2-62) *Ru NMR probe of spin susceptibility in the superconducting state of Sr_2RuO_4* ,
K. Ishida, H. Mukuda, Y. Kitaoka, Z. Q. Mao, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **63**, 060507R (Jan. 2001).
- (2-63) *Spin-triplet superconductivity in Sr_2RuO_4 identified by ^{17}O Knight shift*,
K. Ishida, H. Mukuda, Y. Kitaoka, K. Asayama, Z. Q. Mao, Y. Mori and Y. Maeno,
Nature **394**, 658-660 (Dec. 1998).
- (2-64) *Time-reversal symmetry-breaking superconductivity in Sr_2RuO_4* ,
G. M. Luke, Y. Fudamoto, K. M. Kojima, M. I. Larkin, J. Merrin, B. Nachumi, Y. J. Uemura, Y. Maeno, Z. Q. Mao, Y. Mori, H. Nakamura and M. Sigrist,
Nature **394**, 558-561 (Aug. 1998).
- (2-65) *Superconductivity in a layered perovskite without copper*,
Y. Maeno, H. Hashimoto, K. Yoshida, S. Nishizaki, T. Fujita, J. G. Bednorz and F. Lichtenberg,
Nature **372**, 532-534 (Dec. 1994).

7-3. Sr_2RuO_4 共晶など

- (3-1) *Crystal Growth of the New $\text{Sr}_2\text{RuO}_4 - \text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ Eutectic System by a Floating Zone Method*,
R. Fittipaldi, A. Vecchione, S. Fusanobori, K. Takizawa, H. Yaguchi, J. Hooper, R.S. Perry, and Y. Maeno,
J. Crystal Growth **282**, 152-159 (Aug. 2005).
- (3-2) *Transport Properties of Normal Metal/Anisotropic Superconductor Junctions in the Eutectic System $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-Ru}$* ,
M. Kawamura, H. Yaguchi, N. Kikugawa, Y. Maeno and H. Takayanagi,
Proc. of Int. Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics in the Light of Quantum Computation, "Realizing Controllable Quantum States" eds. Hideaki Takayanagi and Junsaku Nitta, (World Scientific Publishing., 2005) pp. 167-172 (Aug. 2005).
- (3-3) *Tunneling Properties at the Interface between Superconducting Sr_2RuO_4 and a Ru Microinclusion*,
M. Kawamura, H. Yaguchi, N. Kikugawa, Y. Maeno, and H. Takayanagi,
J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 531-534 (Feb. 2005)
- (3-4) *Recent Developments in the 3-Kelvin Phase of Sr_2RuO_4* ,
H. Yaguchi and Y. Maeno,
Physica C **408-410**, 197-200 (Aug. 2004).
- (3-5) *Anomalous Josephson Network in the $\text{Ru-Sr}_2\text{RuO}_4$ Eutectic System*,
J. Hooper, Z.Q. Mao, K.D. Nelson, Y. Liu, M. Wada, and Y. Maeno,

- Phys. Rev. B **70**, 014510-1-4 (Jul. 2004).
- (3-6) *Interface Superconductivity in the Eutectic $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-Ru}$: 3-K Phase of Sr_2RuO_4* ,
H. Yaguchi, M. Wada, T. Akima, Y. Maeno, and T. Ishiguro,
Phys. Rev. B **67**, 214519-1-7 (Jun. 2003).
- (3-7) *Field-Temperature Phase Diagram of the 3-K Phase of Sr_2RuO_4* ,
H. Yaguchi, M. Wada, Y. Maeno, and T. Ishiguro,
Physica C **388-389**, 507-508 (May 2003).
- (3-8) *Search for the Chiral State in $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-Ru}$ Eutectic*,
M. Yoshioka, H. Yaguchi, M. Wada, and Y. Maeno,
Physica C **388-389**, 501-502 (May 2003).
- (3-9) *Field-Temperature Phase Diagram of $\text{Sr}_2\text{RuO}_4\text{-Ru}$ Eutectic*,
M. Wada, H. Yaguchi, M. Yoshioka, and Y. Maeno,
J. Phys. Chem. Solids **63**, 1013-1016 (Jun.-Aug. 2002).
- (3-10) *Observation of Andreev Surface Bound States in the 3-K Phase Region of Sr_2RuO_4* ,
Z.Q. Mao, K.D. Nelson, R. Jin, Y. Liu, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **87**, 037003-1-4 (Jul. 2001).

BEFORE 基盤 S

- (3-11) *Enhancement of Superconductivity of Sr_2RuO_4 to 3 K by Embedded Metallic Microdomains*,
Y. Maeno, T. Ando, Y. Mori, E. Ohmichi, S. Ikeda, S. Nishizaki, and S. Nakatsuji,
Phys. Rev. Lett. **81**, 3765-3768 (Oct. 1998).

7-4. Non-214 Sr-Ru-O

- (4-1) *Tunneling Magnetoresistance Studies of $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
J. Hooper, M. Zhou, ZQ. Mao, R. Perry, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **72**, 134417 (Oct. 2005).
- (4-2) *Metamagnetic Quantum Criticality Revealed by ^{17}O -NMR in the Itinerant Metamagnet $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
K. Kitagawa, K. Ishida, R.S. Perry, T. Tayama, T. Sakakibara, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **95**, 127001-1-4 (Sep. 2005).
- (4-3) *Investigation into the Itinerant Metamagnetism of $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ for the Field Parallel to the Ruthenium Oxygen Planes*,
R.S. Perry, T. Tayama, K. Kitagawa, T. Sakakibara, K. Ishida and Y. Maeno,
J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1270-1274 (Apr. 2005).
- (4-4) *Magnetic Field Dependence of the Specific Heat of $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
F. Obermair, C. Pfleiderer, P. Raychaudhuri, R.S. Perry, and Y. Maeno,
Physica B **359**, 1273-1275 (Apr. 2005).
- (4-5) *Disorder-Sensitive Phase Formation Linked to Metamagnetic Quantum Criticality*,
S.A. Grigera, P. Gegenwart, R.A. Borzi, F. Weickert, A.J. Schofield, R.S. Perry, T. Tayama, T. Sakakibara, Y. Maeno, A.G. Green, and A.P. Mackenzie,
Science **306**, 1154-1157 (Nov. 2004).
- (4-6) *Systematic Approach to the Growth of High-Quality Single-Crystals of $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
R.S. Perry and Y. Maeno,
J. Crystal Growth **271**, 134-141 (Aug. 2004).

- (4-7) *Ru-O Orbital Hybridization and Orbital Occupation in SrRuO_3 : A Magnetic Compton-Profile Study*,
N. Hiraoka, M. Itou, A. Deb, Y. Sakurai, Y. Kakutani, A. Koizumi, N. Sakai, S. Uzuhara, S. Miyaki, H. Koizumi, K. Makoshi, N. Kikugawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **70**, 054420-1-4 (Aug. 2004).
- (4-8) *Unusual Oscillation in Tunneling Magnetoresistance near a Quantum Critical Point in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
J. Hooper, Z.Q. Mao, R. Perry, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **92**, 257206-1-4 (Jun. 2004).
- (4-9) *de Haas-van Alphen Effect Across the Metamagnetic Transition in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
R.A. Borzi, S.A. Grigera, R.S. Perry, N. Kikugawa, K. Kitagawa, Y. Maeno, and A. P. Mackenzie,
Phys. Rev. Lett. **92**, 216403-1-4 (May 2004)
- (4-10) *Multiple First-Order Metamagnetic Transitions and Quantum Oscillations in Ultra-pure $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
R.S. Perry, K. Kitagawa, S.A. Grigera, R.A. Borzi, A.P. Mackenzie, K. Ishida, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **92**, 166602-1-4 (Apr. 2004).
- (4-11) *The Out-of-Plane Magneto-Resistivity of $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
R. Perry, A. Mackenzie, and Y. Maeno,
Physica B **329-333**, 904-905 (May 2003).
- (4-12) *Angular Dependence of the Magnetic Susceptibility in the Itinerant Metamagnet $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
S.A. Grigera, R.A. Borzi, A.P. Mackenzie, S.R. Julian, R.S. Perry, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **67**, 214427-1-8 (Jun. 2003).
- (4-13) *Observation of Two-Dimensional Spin Fluctuations in the Bilayer Ruthenate $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ by Inelastic Neutron Scattering*,
L. Capogna, E.M. Forgan, S.M. Hayden, A. Wildes, J.A. Duffy, A.P. Mackenzie, R.S. Perry, S. Ikeda, Y. Maeno, and S.P. Brown,
Phys. Rev. B **67**, 012504 -1-4 (Jan. 2003).
- (4-14) *Induced Metamagnetism in the Itinerant Bilayer Ruthenate $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
L. Capogna, E.M. Forgan, G.J. McIntyre, N. Burton, P.G. Kealey, R.S. Perry, L.M. Galvin, A.P. Mackenzie, S. Ikeda, and Y. Maeno,
Applied Physics A **74**, S926-S928 (Dec. 2002).
- (4-15) *Metamagnetic Transition and Low-Energy Spin Density Fluctuations in $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
L. Capogna, E.M. Forgan, S.M. Hayden, G.J. McIntyre, A. Wildes, A.P. Mackenzie, J.A. Duffy, R.S. Perry, S. Ikeda and Y. Maeno,
Lecture Notes in Physics **603**, 290-302 (2002).
- (4-16) *Effect of Pressure on Metamagnetic $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
M. Chiao, C. Pfleiderer, S. Julian, G. Lonzarich, R. Perry, A. Mackenzie, and Y. Maeno,
Physica B **312**, 698-699 (Mar. 2002).
- (4-17) *Sensitivity to Disorder of the Metallic State in the Ruthenates*,
L. Capogna, A.P. Mackenzie, R.S. Perry, S.A. Grigera, L.M. Galvin, P. Raychaudhuri, A.J. Schofield, C.S. Alexander, G. Cao, S.R. Julian, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **88**, 076602-1-4 (Feb. 2002).
- (4-18) *Magnetic Field-Turned Quantum Criticality in the Metallic Ruthenate $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$* ,
S.A. Grigera, R.S. Perry, A.J. Schofield, M. Chiao, S.R. Julian, G.G. Lonzarich, S.I. Ikeda, Y. Maeno, A.J. Millis, and A.P. Mackenzie,
Science **294**, 329-332 (Oct. 2001).

7-5. $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$

- (5-1) *Orbital-Selective Mass Enhancements in Multiband $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ Systems Analyzed by the Extended Drude Model*,
JS. Lee, SJ. Moon, TW. Noh, S. Nakatsuji, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **96**, 057401 (Feb. 2006).
- (5-2) *Structural Aspects of Metamagnetism in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$: Evidence for Field Tuning of Orbital Occupation*,
M. Kriener, P. Steffens, J. Baier, O. Schumann, T. Zabel, T. Lorenz, O. Friedt, R. Müller, A. Gukasov, P. G. Radaelli, P. Reutler, A. Revcolevschi, S. Nakatsuji, Y. Maeno, and M. Braden,
Phys. Rev. Lett. **95**, 267403 (Dec. 2005).
- (5-3) *Severe Fermi Surface Reconstruction at a Metamagnetic Transition in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ (for $0.2 \leq x \leq 0.5$)*,
L. Balicas, S. Nakatsuji, D. Hall, T. Ohnishi, Z. Fisk, Y. Maeno, and DJ. Singh,
Phys. Rev. Lett. **95**, 196407 (Nov. 2005).
- (5-4) *High Pressure Diffraction Studies on Ca_2RuO_4* ,
P. Steffens, O. Friedt, P. Alireza, W.G. Marshall, W. Schmidt, F. Nakamura, S. Nakatsuji, Y. Maeno, R. Lengsdorf, M. M. Abd-Elmeguid, and M. Braden,
Phys. Rev. B **72**, 094104 (Sep. 2005).
- (5-5) *Orbital Ordering Transition in Ca_2RuO_4 Observed with Resonant X-ray Diffraction*,
I. Zegkinoglou, J. Stempfer, CS. Nelson, JP. Hill, J. Chakhalian, C. Bernhard, JC. Lang, G. Srajer, H. Fukazawa, S. Nakatsuji, Y. Maeno, and B. Keimer,
Phys. Rev. Lett. **95**, 136401 (Sep. 2005).
- (5-6) *Electronic Structure and Evolution of the Orbital State in Metallic $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$* ,
H.J. Noh, S.J. Oh, B.G. Park, J.H. Park, J.Y. Kim, H.D. Kim, T. Mizokawa, L.H. Tjeng, H.J. Lin, C.T. Chen, S. Schuppler, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **72**, 052411 (Aug. 2005).
- (5-7) *Ferro-Type Orbital State in the Mott Transition System $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ Studied by the Resonant X-Ray Scattering Interference Technique*,
M. Kubota, Y. Murakami, M. Mizumaki, H. Ohsumi, N. Ikeda, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **95**, 026401-1-4 (Jul. 2005).
- (5-8) *Lattice Dynamics and the Electron-Phonon Interaction in Ca_2RuO_4* ,
H. Rho, S. L. Cooper, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **71**, 245121-1-6 (Jun. 2005).
- (5-9) *Raman Scattering Studies of $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$* ,
H. Rho, S.L. Cooper, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Physica B **359**, 1270-1272 (Apr. 2005).
- (5-10) *Correlation Effects in Sr_2RuO_4 and Ca_2RuO_4 : Valence-Band Photoemission Spectra and Self-Energy Calculations*,
T.T. Tran, T. Mizokawa, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **70**, 153106-1-4 (Oct. 2004).
- (5-11) *Strongly Enhanced Magnetic Fluctuations in a Large-Mass Layered Ruthenate*,
O. Friedt, P. Steffens, M. Braden, Y. Sidis, S. Nakatsuji, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **93**, 147404-1-4 (Aug. 2004).
- (5-12) *Mechanism of Hopping Transport in Disordered Mott Insulators*,
S. Nakatsuji, V. Dobrosavljevic, D. Tanaskovic, M. Minakata, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **93**, 146401-1-4 (Oct. 2004).

- (5-13) *Bond-Length Dependence of Charge-Transfer Excitations and Stretch Phonon Modes in Perovskite Ruthenates: Evidence of Strong p-d Hybridization Effects*,
J.S. Lee, Y.S. Lee, T.W. Noh, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, R.S. Perry, Y. Maeno, Y. Yoshida, S-I. Ikeda, J.J. Yu, and C.B. Eom,
Phys. Rev. B **70**, 085103-1-6 (Aug. 2004).
- (5-14) *Orbital State and Metal-Insulator Transition in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ($x = 0.0$ and 0.09) Studied by X-ray Absorption Spectroscopy*,
T. Mizokawa, L.H. Tjeng, H.J. Lin, C.T. Chen, S. Schuppler, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **69**, 132410-1-4 (Apr. 2004).
- (5-15) *Metamagnetism in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ in the Verge of the Mott Transition*,
L. Balicas, S. Nakatsuji, D. Hall, Z. Fisk, and Y. Maeno,
Physica B **346**, 344-348 (Apr. 2004).
- (5-16) *Erratum: Electron and Orbital Correlations in $\text{Ca}_{2-x}\text{RuO}_4$ Probed by Optical Spectroscopy*,
J. S. Lee, Y. S. Lee, T. W. Noh, S.-J. Oh, Jaejun Yu, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **92**, 016401-1-4 (Jan. 2004).
- (5-17) *Raman Scattering Studies of Spin, Charge, and Lattice Dynamics in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.2$)*,
H. Rho, S. L. Cooper, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **68**, 100404-1-4 (Sep. 2003).
- (5-18) *Optical Properties and Electron Structure of $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ Compounds*,
L.V. Nomerovannaya, A.A. Makhnev, D.E. Kondakov, M.A. Korotin, VI. Anisimov, and Y. Maeno,
Physics of Metals and Metallography **95** (6): 535-543 (Jun. 2003).
- (5-19) *Pressure Induced Ferromagnetic Metal for a Mott Insulator Ca_2RuO_4* ,
F. Nakamura, Y. Senoo, T. Goto, M. Ito, T. Suzuki, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, Y. Maeno, P. Alireza, and S. R. Julian,
Physica B **329-333**, 803-804 (May 2003).
- (5-20) *Ferromagnetic Correlations in Ca-doped Sr_2RuO_4 : $^{87}\text{SrNMR}$ Study*,
K. Ishida, Y. Minami, Y. Kitaoka, S. Nakatsuji, and Y. Maeno,
Journal of Low Temperature Physics **131**, 1227-1236 (Jun. 2003).
- (5-21) *Heavy-Mass Fermi Liquid near a Ferromagnetic Instability in Layered Ruthenates*,
S. Nakatsuji, D. Hall, L. Balicas, Z. Fisk, K. Sugahara, M. Yoshioka, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **90**, 137202-1-4 (Apr. 2003).
- (5-22) *Neutron-Diffraction Study of the Crystal Structure of $\text{Ca}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{RuO}_4$* ,
O. Friedt, M. Braden, G. Andre, S. Nakatsuji, Y. Maeno,
Applied Physics A-Materials Science & Processing **74**, S1627-S1629, Part 2, Suppl. S (Dec. 2002).
- (5-23) *Electron and Orbital Correlations in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ Probed by Optical Spectroscopy*,
J.S. Lee, Y.S. Lee, T.W. Noh, S.-J. Oh, Jaejun Yu, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **89**, 257402-1-4 (Dec. 2002).
- (5-24) *Pressure-Turned Collapse of the Mott-Like State in $\text{Ca}_{n+1}\text{Ru}_n\text{O}_{3n+1}$ ($n=1,2$): Raman Spectroscopic Studies*,
C.S. Snow, S.L. Cooper, G. Cao, J.E. Crow, H. Fukazawa, S. Nakatsuji, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **89**, 226401-1-4 (Nov. 2002).
- (5-25) *Anomalous Spin-Density Distribution on Oxygen and Ru in $\text{Ca}_{1.5}\text{Sr}_{0.5}\text{RuO}_4$ Polarized Neutron Diffraction Study*,
A. Gukasov, M. Braden, R.J. Papoular, S. Nakatsuji, and Y. Maeno,
Phy. Rev. Lett. **89**, 087202-1-4 (Aug. 2002).
- (5-26) *From Mott Insulator to Ferromagnetic Metal: a Pressure Study of Ca_2RuO_4*

- F. Nakamura, T. Goko, M. Ito, T. Fujita, S. Nakatsuji, H. Fukazawa, Y. Maeno, P. Alireza, D. Forsythe, and S. R. Julian,
Phys. Rev. B **65**, 220402-1-4 (Jun. 2002).
- (5-27) *Ferromagnetic and Structural Instabilities in $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$* ,
S. Nakatsuji and Y. Maeno,
International Journal of Modern Physics B, **16**, **20,21** & **22**, 3273-3278 (Aug. 2002).
- (5-28) *Filling Control of the Mott Insulator Ca_2RuO_4* ,
H. Fukazawa and Y. Maeno,
J. Phys. Soc. Jpn. **70**, 460-467 (Feb. 2001).
- (5-29) *Spin-Orbit Coupling in the Mott Insulator Ca_2RuO_4* ,
T. Mizokawa, L. H. Tjeng, G. A. Sawatzky, G. Ghiringhelli, O. Tjernberg, N. B. Brookes, H. Fukazawa, S. Nakatsuji, and Y. Maeno,
Phys. Rev. Lett. **87**, 077202-1-4 (Aug. 2001).

7-6. その他の超伝導 (Other superconductors)

- (6-1) *Nearly Free Electrons in the Layered Oxide Superconductor $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$* ,
Mike Sutherland, Peter D. A. Mann, Christoph Bergemann, Shingo Yonezawa, and Yoshiteru Maeno,
Phys. Rev. Lett. **96**, 097008 (Mar. 2006).
- (6-2) *Anisotropic Behavior of Knight Shift in Superconducting State of $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$* ,
Y. Ihara, K. Ishida, H. Takeya, C. Michioka, M. Kato, Y. Itoh, K. Yoshimura, K. Takada, T. Sasaki, H. Sakurai and E. Takayama-Muromachi,
J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 013708 1-4 (Jan. 2006).
- (6-3) *Possible Spin Triplet Superconductivity in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ - ^{59}Co NMR Studies*,
M. Kato, C. Michioka, T. Waki, Y. Itoh, K. Yoshimura, K. Ishida, H. Sakurai, E. Takayama-Muromachi, K. Takada, and T. Sasaki,
Journal of Physics-Condensed Matter **18**, 669-682 (Jan. 2006).
- (6-4) *Type-I superconductivity of the Layered Silver Oxide $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$* ,
S. Yonezawa and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **72**, 180504 (Nov. 2005).
- (6-5) *^{17}O NMR Measurements on Superconducting $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$* ,
Y. Ihara, K. Ishida, K. Yoshimura, K. Takada, T. Sasaki, H. Sakurai, and E. Takayama-Muromachi,
J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 2177-2180 (Aug. 2005).
- (6-6) *^{59}Co - NMR and NQR Studies in the Unconventional Superconductor $\text{Na}_{0.35}\text{CoO}_2 \cdot 1.3\text{H}_2\text{O}$* ,
M. Kato, C. Michioka, T. Waki, Y. Itoh, K. Yoshimura, K. Ishida, H. Sakurai, E. Takayama-Muromachi, K. Takada, and T. Sasaki,
Physica B-Condensed Matter **359**, 482-484 (Apr. 2005).
- (6-7) *Weak Magnetic Order in Bilayered-Hydrate $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Structure Probed by Co Nuclear Quadrupole Resonance -Proposed Phase Diagram in Superconducting $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$* ,
Y. Ihara, K. Ishida, C. Michioka, M. Kato, K. Yoshimura, K. Takada, T. Sasaki, H. Sakurai, E. Takayama-Muromachi,
J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 867-870 (Mar. 2005).
- (6-8) *Nonlinear Temperature Dependence of Resistivity in Single Crystal $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$* ,
S. Yonezawa, and Y. Maeno,
Phys. Rev. B **70**, 184523-1-5 (Nov. 2004).

- (6-9) *Correlation between Superconducting Transition Temperature T_c and Increase of Nuclear Spin-Lattice Relaxation Rate Divided by Temperature $1/T_1T$ at T_c in the Hydrate Cobaltate $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$,*
Y. Ihara, K. Ishida, C. Michioka, M. Kato, K. Yoshimura, K. Takada, T. Sasaki, H. Sakura, and E. Takayama-Muromachi,
J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 2069-2072 (Aug. 2004).
- (6-10) *Unconventional Superconductivity and Nearly Ferromagnetic Spin Fluctuations in $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$,*
K. Ishida, Y. Ihara, Y. Maeno, C. Michioka, M. Kato, K. Yoshimura, K. Takada, T. Sasaki, H. Sakurai, and E. Takayama-Muromachi,
J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 3041-3044 (Dec. 2003).

7-7. 超伝導理論 (Theory of Superconductivity)

- (7-1) *Higher order perturbation theory for anisotropic pairings in repulsive Hubbard model,*
T. Nomura and K. Yamada,
Physica C **408**, 300-301 (Aug. 2004).
- (7-2) *Theory of superconductivity in strongly correlated electron systems,*
Y. Yanase, T. Jujo, T. Nomura, H. Ikeda, T. Hotta, and K. Yamada,
Physics Reports **387**, 1-149 (Nov. 2003).
- (7-3) *Higher order perturbation expansion for pairing interaction in repulsive Hubbard model,*
T. Nomura and K. Yamada,
J. Phys. Soc. Jpn. **72**, 2053-2063 (Aug. 2003).
- (7-4) *Theory of superconducting mechanism and gap structure of Sr_2RuO_4 ,*
T. Nomura and K. Yamada,
Physica C **388**, 495-496 (May 2003).
- (7-5) *Roles of electron correlations in the spin-triplet superconductivity of Sr_2RuO_4 ,*
T. Nomura and K. Yamada,
J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 1993-2004 (Aug. 2002).
- (7-6) *Theory of the spin-triplet superconductivity in Sr_2RuO_4 , based on perturbation approach to three-band Hubbard model,*
T. Nomura and K. Yamada,
J. Phys. Chem. Solids **63**, 1337-1341 (Jun.-Aug. 2002).
- (7-7) *Detailed investigation of gap structure and specific heat in the p-wave superconductor Sr_2RuO_4 ,*
T. Nomura and K. Yamada,
J. Phys. Soc. Jpn. **71**, 404-407 (Feb. 2002).